

El trabajo *México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono (MEDEC)* aporta una evaluación sólida y rigurosa de los costos de las distintas opciones para un desarrollo de bajas emisiones de carbono, comprendiendo desde la eficiencia energética hasta las plantaciones. Este estudio también pone de manifiesto que aún dependiendo únicamente de las tecnologías existentes, hay numerosas medidas con costos relativamente bajos que se pueden implementar en México (y en la mayoría de los países del mundo) en el corto plazo que pueden reducir significativamente la intensidad del desarrollo con respecto a las emisiones de carbono. Dicho análisis es crucial a nivel nacional para proveer de insumos al proceso de diseños de políticas para la transición hacia una economía de bajas emisiones, y es encomiable que el Gobierno de México haya apoyado el presente estudio así como otros análisis sobre el tema de la mitigación del cambio climático.

**Lord Nicholas Stern**

*Profesor de la Cátedra IG Patel de Economía y Gobierno en la London School of Economics and Political Science*

El análisis que se presenta en el documento *México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono* provee evidencia adicional que demuestra que es posible mantener el aumento promedio de la temperatura global por debajo del peligroso umbral de los 2°C, a un costo que será considerablemente inferior a los costos resultantes de los impactos que enfrentaríamos de no actuar el día de hoy.

**Patricia Arendar**

*Directora Ejecutiva, Greenpeace México*

Este estudio del Banco Mundial es un aporte oportuno a las discusiones actualmente en curso sobre el marco global que necesitamos crear, a fin de emprender las acciones para la mitigación del cambio climático al nivel que la humanidad lo requiere. El estudio también cumplió un rol clave en el reciente desarrollo de un punto de vista mexicano sobre la economía del cambio climático, y hemos podido corroborar que en México existen abundantes oportunidades de bajo costo y de bajas emisiones de carbono con importantes cobeneficios adicionales. En nuestro actual esfuerzo por evaluar las implicancias económicas del cambio climático en América Latina y el Caribe, tenemos la certeza que el estudio servirá de ejemplo para otros países y esperamos arribar a oportunidades sinérgicas similares para un desarrollo de menores emisiones de carbono.

**Alicia Bárcena**

*Secretaria Ejecutiva de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe*



México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono

# MÉXICO:

*estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*



Todd M. Johnson

Claudio Alatorre

Zayra Romo

Feng Liu







# México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono

Todd M. Johnson  
Claudio Alatorre  
Zayra Romo  
Feng Liu



**BANCO MUNDIAL**



© 2009 The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank

© 2009 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial  
1818 H Street, NW  
Washington, DC 20433, USA

Todos los derechos reservados

Primera edición en castellano: noviembre de 2009

Para esta edición:

© 2009 Banco Mundial en coedición con Mayol Ediciones S.A.  
[www.mayolediciones.com](http://www.mayolediciones.com)

ISBN 978-958-8307-75-6

Diseño de cubierta: Andrés Balcázar/Istockphoto  
Edición y diagramación: Mayol Ediciones S.A.

Impreso y hecho en Colombia - Printed and made in Colombia

# Contenido

Prólogo	ix
Los autores	xiii
Agradecimientos	xv
Siglas y abreviaturas	xvii
Resumen ejecutivo	xix
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
Objetivos del estudio	1
Importancia estratégica para México del desarrollo de bajas emisiones	4
Emisiones de gases de efecto invernadero en México	6
Acciones sobre cambio climático de México	10
Panorama general del análisis sectorial y estructura del informe	11
<b>2 Electricidad</b>	<b>15</b>
El escenario de la línea base	17
El escenario MEDEC de bajas emisiones	20
Barreras para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la generación de electricidad	24
Conclusiones	26
<b>3 Petróleo y gas</b>	<b>29</b>
El escenario de la línea base	32
El escenario MEDEC de bajas emisiones	32
Barreras a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero	37
Conclusiones	39
<b>4 Uso final de energía</b>	<b>41</b>
El escenario de la línea base	43
El escenario MEDEC de bajas emisiones	49
Barreras a la mitigación de gases de efecto invernadero	53
Conclusiones	60

<b>5</b>	<b>Transporte</b>	<b>61</b>
	El escenario de la línea base	62
	El escenario MEDEC de bajas emisiones	64
	Barreras a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero	68
	Conclusiones	70
<b>6</b>	<b>Sector agrícola y forestal</b>	<b>73</b>
	El escenario de la línea base	74
	El escenario MEDEC de bajas emisiones	75
	Barreras a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero	81
	Conclusiones	83
<b>7</b>	<b>Un escenario de bajas emisiones para México</b>	<b>85</b>
	La evolución de las emisiones en el escenario de la línea base	85
	La trayectoria alternativa de bajas emisiones del estudio MEDEC	87
	Los costos (o beneficios) netos de la reducción de las emisiones	91
	Impacto macroeconómico de las intervenciones del estudio MEDEC	93
<b>8</b>	<b>Elementos de un programa de desarrollo de bajas emisiones</b>	<b>95</b>
	Áreas de alta prioridad	95
	“Factibilidad” y barreras a la implementación	96
	Financiamiento de las intervenciones de bajas emisiones	100
	Políticas para el desarrollo de bajas emisiones	102
	La importancia de los cobeneficios	104
	Acciones de corto plazo	106
	Apoyo internacional	107
	<b>Apéndice A. Resumen de las intervenciones del escenario MEDEC</b>	<b>111</b>
	<b>Apéndice B. Resumen de la metodología de análisis beneficio-costos</b>	<b>113</b>
	<b>Apéndice C. Supuestos de las intervenciones</b>	<b>117</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>147</b>
	<b>Cuadros</b>	
1.1	Intervenciones del estudio MEDEC por sector	13
2.1	Costos nivelados de las principales tecnologías para la generación de electricidad \$/MWh	21
2.2	Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector eléctrico	23

<i>Contenido</i>	vii
2.3 Desarrollo de bajas emisiones en el sector eléctrico mexicano: barreras y acciones correctivas	25
3.1 Potencial de cogeneración en Pemex	33
3.2 Potencial para el reemplazo de sellos de compresores en los complejos procesadores de gas de México	36
3.3 Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector petróleo y gas	37
4.1 Resumen de las intervenciones MEDEC en los sectores de uso final de energía estacionario	53
4.2 Eficiencia en el uso final de energía: barreras y acciones correctivas	54
5.1 Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector transporte	70
6.1 Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector agrícola y forestal	82
7.1 Supuestos e indicadores clave para el escenario de la línea base	86
7.2 Resultados y cambios principales por sector bajo el escenario MEDEC	89
7.3 Efecto conjunto de las intervenciones MEDEC en la economía mexicana	94
8.1 Requerimientos de inversión del escenario MEDEC hasta el 2030	100
8.2 Intervenciones de bajas emisiones según fuente de financiamiento	101
8.3 Intervenciones de corto plazo	108

## Gráficos

1 Línea base y emisiones de gases de efecto invernadero proyectadas según el escenario MEDEC, por sector, 2008-30	xxii
2 Curva de costos marginales de abatimiento	xxiv
1.1 Comparación de las emisiones de GEI y del PIB per cápita para los países del G8+5, 2003	8
1.2 Inventario de emisiones de GEI por fuente	9
1.3 Emisiones de GEI procedentes de la producción y consumo de energía, por sector	9
2.1 Generación de electricidad por tipo de fuente de energía en países seleccionados, 2005	16
2.2 Pérdidas en transmisión y distribución en el sector eléctrico en países seleccionados	18
2.3 Generación de electricidad por fuente de energía en México: tendencia histórica y proyectada según el escenario de la línea base, 1965-2030	19
2.4 Emisiones de GEI procedentes de la generación de electricidad: escenario de la línea base <i>versus</i> escenario MEDEC, 2008-30	20
2.5 Generación de electricidad por fuente de energía en el escenario de la línea base <i>versus</i> el escenario MEDEC	23

3.1	Deuda y ganancias de Pemex en los últimos años	31
3.2	Producción de gas natural en México	31
4.1	Usos finales de energía en México por sector, 2006	42
4.2	Comparación internacional de tendencias de intensidad energética	43
4.3	Uso de energía en la actividad industrial por subsector, 2006	44
4.4	Uso final de energía por sector. Escenario de la línea base	49
4.5	Costos de mitigación de las estufas mejoradas	52
5.1	Parque vehicular: tendencia histórica y crecimiento proyectado para países seleccionados	62
5.2	Precios de gasolina y diesel en México, 1980-2007	63
5.3	Parque vehicular: tendencia histórica y proyección bajo el escenario de la línea base, 1980-2030	63
5.4	Emisiones de GEI de la línea base por modo de transporte	64
5.5	Emisiones del escenario MEDEC para el transporte	65
6.1	Distribución geográfica de las intervenciones en el sector agrícola y forestal	76
6.2	Emisiones de GEI en USCUS bajo el escenario MEDEC	81
7.1	Emisiones de GEI en el escenario de la línea base, por fuente	87
7.2	Reducción proyectada de emisiones por sector bajo el escenario MEDEC de bajas emisiones	89
7.3	Curva de costos marginales de abatimiento	92
7.4	Criterios para la selección de intervenciones de bajas emisiones	93
8.1	Curva de inversiones marginales de abatimiento	98

## **Recuadros**

1.1	Metodología de análisis costo-beneficio	2
1.2	Criterios para seleccionar las intervenciones	11
3.1	El financiamiento de los proyectos de infraestructura de Pemex con altos beneficios ambientales	38
4.1	Reducción de emisiones, ahorros de tiempo y beneficios para la salud mediante el uso de estufas mejoradas	52
4.2	Los subsidios a las tarifas residenciales y la subvaluación de la electricidad	57
5.1	Más tiempo y mejor salud: los cobeneficios de reducir las emisiones de carbono en el sector transporte	69
8.1	Políticas de apoyo al desarrollo de bajas emisiones	103

## Prólogo

Una de las razones más apremiantes para buscar un desarrollo de bajas emisiones es que se prevén impactos del cambio climático potencialmente severos, tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo, y que el riesgo de los impactos más catastróficos se puede reducir si mitigamos las emisiones de gases de efecto invernadero. El desafío de reducir las emisiones de carbono es serio: los principales modelos científicos señalan que limitar el aumento de las temperaturas medias globales a menos de 2°C exigirá que las emisiones globales de gases de efecto invernadero alcancen su punto máximo dentro de los próximos 10-15 años y que para el 2050 se reduzcan a niveles aproximadamente un 50 por ciento por debajo del nivel alcanzado en 1990. Si bien numerosos países reconocen la necesidad de reducir las emisiones de carbono, existe un grado considerable de incertidumbre sobre cuál será el costo en las distintas naciones, qué medidas se pueden tomar en el corto y largo plazo, y qué tan costo efectivas son las intervenciones específicas para reducir las emisiones de carbono.

En el ámbito del desarrollo es cada vez más frecuente hablar de un desarrollo *de bajas emisiones* (o “*low-carbon*”), lo que añade una importante dimensión climática al concepto de sostenibilidad económica. El documento *México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono (MEDEC)* provee un análisis a escala nacional de las opciones de bajas emisiones en el país de América Latina que tiene un mayor nivel de consumo de combustibles fósiles. Este estudio es el primero de una serie de estudios sobre mitigación que elaborará el Banco Mundial en países clave en desarrollo y de ingresos medios.

Por distintas razones, la elección de México para desarrollar un estudio sobre la mitigación del cambio climático fue lógica. A nivel internacional, México ha demostrado un fuerte compromiso para impulsar acciones globales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tal como lo refleja su actitud proactiva en las discusiones internacionales sobre cambio climático y su agresiva meta para reducir las emisiones de carbono, que anunció en la Conferencia sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas celebrada en Poznań en 2008. Por lo que se refiere al ámbito local, México recientemente publicó el *Programa Especial de Cambio Climático* (PECC), que establece

un amplio marco de acción para enfrentar los impactos del cambio climático en México y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en todos los sectores.

El presente trabajo, que busca complementar el PECC y otros estudios llevados a cabo en México, presenta los resultados del esfuerzo desarrollado durante dos años por un equipo compuesto por investigadores mexicanos e internacionales con el objetivo de identificar y evaluar las medidas de alta prioridad destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El estudio utiliza dos herramientas de evaluación importantes. La primera es una metodología económica para estimar los costos de las intervenciones y poderlos comparar entre un sector y otro. Esta metodología permite, por ejemplo, comparar los costos de reducir las emisiones por la utilización de refrigeradores residenciales más eficientes con la reducción de emisiones alcanzada mediante un programa de plantaciones o de reforestación. La segunda herramienta es un modelo integrado económico y de emisiones que contabiliza las emisiones de carbono anuales, así como los costos de inversión requeridos durante las próximas dos décadas.

Las discusiones sobre un desarrollo de bajas emisiones a menudo se centran en la necesidad de realizar acciones de mitigación en las actividades relacionadas con la producción y el consumo de energía –incluyendo el sector transporte y el eléctrico–. Es en el sector del autotransporte donde ha tenido lugar el aumento más rápido de emisiones en México durante las últimas tres décadas, y se espera que con la cada vez mayor utilización de automóviles y camionetas se mantendrá este ritmo de aumento de emisiones en el futuro. Este estudio presenta una investigación original sobre diversas intervenciones de bajas emisiones en el sector transporte, incluyendo medidas para mejorar la eficiencia de los vehículos nuevos y usados, así como medidas para mejorar el transporte público urbano. Puesto que un porcentaje elevado del uso de energía por parte del sector transporte en México tiene lugar en las ciudades, existe un potencial considerable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la modificación de la organización del uso del suelo urbano y las mejoras en la disponibilidad de transporte público. Si bien el poner en práctica cambios significativos en el diseño urbano llevará tiempo, en el corto plazo se pueden implementar otras medidas, como invertir en sistemas de transporte tipo BRT, fortalecer otros sistemas de transporte público y reorganizar los sistemas de transporte de carga.

El presente estudio analiza un conjunto de opciones de eficiencia energética que se encuentran disponibles en México, incluyendo mejoras de eficiencia en los sectores eléctrico y petróleo y gas, así como medidas dirigidas a las actividades que presentan un alto crecimiento en el consumo de energía, como el acondicionamiento de aire y la refrigeración. El estudio también evalúa un conjunto de opciones de energías renovables que utilizan los vastos recursos eólicos, solares, de biomasa, hidráulicos y geotérmicos que tiene el país.

Pero el desarrollo de bajas emisiones no es sólo una cuestión de producción y consumo de energía. En México una de las fuentes más graves de emisiones de gases

de efecto invernadero continúa siendo la deforestación, a pesar de que en las últimas décadas la tasa de deforestación ha caído año con año. La ampliación de los programas de manejo forestal o de la vida silvestre, así como los esfuerzos para incrementar la superficie forestal, pueden contribuir a la creación de empleos en las zonas rurales y servir para que los bosques mexicanos se conviertan en sumideros netos de CO<sub>2</sub> en los próximos años.

Una pregunta fundamental que surge con frecuencia respecto de las opciones de mitigación de bajo costo es por qué no se han implementado aún. Tal como lo demuestra el presente estudio, a menudo la disponibilidad de tecnología comercial y aún los bajos costos financieros no son suficientes para vencer las barreras relacionadas con las carencias institucionales y cognitivas, las limitaciones de tipo regulatorio y legal, o las normas sociales. En la incapacidad para superar estos “costos de transacción” se encuentra por lo general la raíz del problema de por qué no se implementan acciones que supuestamente son de bajo costo. A fin de vencer parcialmente este dilema, uno de los criterios explícitos utilizados en este estudio para identificar las medidas de bajas emisiones fue que dichas acciones ya se hubiesen implementado en cierta escala en México o en economías similares fuera de México. Para que el desarrollo de bajas emisiones deje de ser marginal y ocupe el escenario principal, será necesario definir un paquete de estímulos nuevos, incluyendo la educación y capacitación de la población y de los consumidores, la ejecución de proyectos demostrativos, la formulación de normas y reglamentaciones y la creación de incentivos financieros.

Los próximos años serán críticos para poner en ejecución un programa internacional de mitigación del cambio climático serio, comenzando con los principales países industrializados e involucrando rápidamente a los grandes países en desarrollo. Numerosos estudios sobre medidas de mitigación se han dirigido al largo plazo, muchos de ellos enfocándose en la promesa de tecnologías nuevas para alcanzar reducciones significativas en las emisiones de carbono. Si bien las tecnologías nuevas serán fundamentales para cumplir con las metas de más largo plazo relacionadas con la reducción de emisiones para evitar los impactos más severos del cambio climático, muchas tecnologías promisorias de bajas emisiones no estarán disponibles comercialmente por más de una década, período durante el cual el mundo perderá grados valiosos de libertad para estabilizar las concentraciones atmosféricas si no se han implementado de manera simultánea y enérgica opciones de corto plazo. Uno de los objetivos explícitos del presente estudio fue identificar un conjunto de opciones que pudiesen contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de carbono durante las próximas dos décadas y que pudiesen comenzar en forma casi inmediata. A medida que se desarrollen tecnologías nuevas y que se reduzcan los costos de las tecnologías actuales, el conjunto de opciones para el desarrollo de bajas emisiones será aún más amplio.

Si bien este estudio se centra en México, es muy probable que muchas de las opciones de bajas emisiones que aquí se presentan –como las tecnologías específicas para

eficiencia energética y energías renovables o los programas de transporte urbano o de manejo forestal– se puedan aplicar en otros países. Abrigamos la esperanza de que tanto las metodologías como los resultados que se presentan en este volumen sean de utilidad para México y otros países en su búsqueda para definir y poner en práctica un desarrollo de bajas emisiones.

*Laura Tuck, Directora*  
Departamento de Desarrollo Sostenible  
Región de América Latina y el Caribe  
Banco Mundial

## Los autores

**Todd M. Johnson** es especialista principal en energía en el Departamento de Desarrollo Sostenible de la Región de Latinoamérica y el Caribe del Banco Mundial. Desde que comenzara a formar parte del Banco, en 1991, ha trabajado en numerosos temas relacionados con la energía y el medio ambiente, como el control de la lluvia ácida y el cambio climático. Fue coautor de diferentes artículos e informes, como *China: Issues and Options in Greenhouse Gas Emissions Control* (1994), *Climate Change Mitigation in the Urban Transport Sector* (2003) y *Residential Electricity Subsidies in Mexico: Exploring Options for Reform and for Enhancing the Impact on the Poor* (2009). Posee un doctorado en Economía de la Universidad de Hawái.

**Claudio Alatorre** es consultor independiente especialista en los costos y beneficios de la transición energética (eficiencia energética, energías renovables y transporte sostenible) y en el diseño e implementación de marcos normativos e institucionales favorables. Ha trabajado en instituciones académicas, ONG, empresas privadas, medios de comunicación, organismos multilaterales y bilaterales y en organismos gubernamentales tanto en México como en otros países. Tiene un doctorado en Ingeniería de la Universidad de Warwick (Reino Unido).

**Zayra Romo** es especialista en electricidad en el Departamento de Desarrollo Sostenible de la Región de Latinoamérica y el Caribe del Banco Mundial. Realiza análisis técnicos y financieros para los proyectos de infraestructura de generación y transmisión en el sector energético. Antes de formar parte del Banco, se desempeñó como analista técnica en Electricité de France, donde trabajó en el mejoramiento del desempeño de las centrales generadoras de electricidad en México. Posee una maestría en Conversión de Energía de la Universidad de Offenburg de Alemania.

**Feng Liu** es especialista principal en energía en el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de Energía (ESMAP), asociación de agencias donantes administrada por el Banco Mundial. Durante los últimos 10 años ha participado en el desarrollo e implementación de proyectos de inversión en eficiencia energética y energías renovables

en la Región del Este de Asia y Pacífico, en particular en China, Indonesia y Mongolia. Antes de formar parte del Banco, trabajó cinco años en investigación sobre análisis y políticas energéticas en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley en California. Cuenta con un doctorado en Economía del Medio Ambiente de la Universidad Johns Hopkins.

## Agradecimientos

El Banco Mundial encaró el presente estudio como parte integrante de seis estudios sobre la disminución de las emisiones de carbono que llevará a cabo en países en desarrollo y de ingresos medios. El concepto guía del estudio fue analizado con las autoridades gubernamentales de México en 2007; las secretarías de energía (SENER), medio ambiente (SEMARNAT) y hacienda (SHCP) hicieron suya la decisión de realizar el estudio.

Este estudio fue respaldado por el Banco Mundial mediante fondos provenientes de la Red de Desarrollo Sostenible destinados a actividades regionales sobre cambio climático y con el apoyo del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energía (ESMAP) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Banco Mundial. Se expresa con gratitud el reconocimiento por la asistencia financiera del gobierno del Reino Unido (por intermedio del Departamento para el Desarrollo Internacional [DFID]), a través del ESMAP.

El presente informe fue preparado por Todd M. Johnson (gerente de este proyecto y autor principal del informe), Zayra Romo y Feng Liu, todos ellos funcionarios del Banco Mundial, y por Claudio Alatorre, consultor. También participaron los siguientes especialistas:

**Sector agrícola y forestal, y bioenergía:** Javier Aguilón, Marcela Olguín-Álvarez, Tere Arias, Víctor Berrueta, Guillermo Colunga, Jorge Etchevers, Carlos Alberto García, Adrián Ghilardi, Rocío Gosch, Gabriela Guerrero, Ben de Jong, Omar Masera, Mauricio Pareja, Manuela Prehn, Oliver Probst, Enrique Riegelhaupt, Emilio de los Ríos y Juan Angel Tinoco. Estos expertos representan distintas organizaciones mexicanas y son miembros de la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO).

**Modelo CGE:** Roy Boyd, Universidad de Ohio, y María Eugenia Ibararán, Universidad Iberoamericana Puebla.

**Electricidad:** Myriam Cisneros, Jorge Gasca, Moisés Magdaleno, Elizabeth Mar, Luis Melgarejo y Esther Palmerín, Instituto Mexicano del Petróleo.

**Coordinación, modelo energético y ambiental, eficiencia energética y petróleo y gas:** Odón de Buen, Emmanuel Gómez-Morales, Genice Kirat Grande, Jorge M. Islas-Samperio, Paloma Macías-Guzmán, Fabio Manzini, María de Jesús Pérez-Orozco y Mario Alberto Ríos-Fraustro, varios de ellos afiliados al Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Análisis costo-beneficio:** Carlos E. Carpio, Tomás Hasing, James B. London, Matías Nardi, William A. Ward, Gary Wells y Samuel Zapata, Universidad de Clemson, Estados Unidos.

**Transporte:** Amílcar López, Jorge Macías-Mora, Hilda Martínez, Gabriela Niño, Luis Sánchez-Cataño y Juan Sebastián Pereyra, Centro de Transporte Sostenible de México, A.C.

Los integrantes del equipo del estudio por parte del Banco Mundial fueron: Benoit Bosquet (uso del suelo y subsector forestal), Francisco Sucre (petróleo y gas) y Jas Singh (eficiencia energética).

El informe recibió comentarios y sugerencias de parte de Ricardo Ochoa, Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), Fernando Tudela y Juan Mata, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Adrián Fernández, Instituto Nacional de Ecología (INE), Verónica Irastorza, Francisco Acosta y Diego Arjona, Secretaría de Energía (SENER), Emiliano Pedraza, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), Vicente Aguinaco, Comisión Federal de Electricidad (CFE), Carlos De Regules, Petróleos Mexicanos (PEMEX) y numerosos críticos anónimos integrantes de distintas instituciones de México.

La preparación del informe se realizó bajo la dirección de Laura Tuck, Axel van Trotsenburg y Philippe Charles Benoit. Los siguientes funcionarios del Banco Mundial aportaron sus comentarios y sugerencias durante el proceso de revisión: Roberto Aiello, Jocelyne Albert, Amarquaye Armar, Juan Carlos Belausteguigoitia, Pablo Fajnzylber, Marianne Fay, Charles M. Feinstein, Christophe de Gouvello, Ricardo Hernandez, Richard Hosier, Irina Klytchnikova, Kseniya Lvovsky, John Nash, Paul Procee, John Allen Rogers, Gustavo Saltiel, Ashok Sarkar, Gary Stuggins, Natsuko Toba y Walter Vergara.

Se agradece profundamente a Janina Franco, Aziz Gokdemir, Barbara Karni y Nita Congress su asistencia en la producción de este informe.

## Siglas y abreviaturas

BPE	barril de petróleo equivalente
BRT	bus rapid transit (transporte rápido con autobuses)
CAFE	corporate average fuel economy (promedio corporativo de eficiencia vehicular)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CGE	computable general equilibrium (equilibrio general computable)
CICC	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO	monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> e	dióxido de carbono equivalente
CONAE	Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (ahora CONUEE)
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
DDG	dried distiller's grains (pasta de destilería)
ENACC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
ESCO	energy service company (empresa de servicios energéticos)
FCC	fluidized catalytic cracking (craqueo catalítico de fluidos)
FIDE	Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica
GEF	Global Environment Facility (Fondo para el Medio Ambiente Mundial)
GEI	gases de efecto invernadero
GJ	gigajoule
gas LP	gas licuado de petróleo
GNL	gas natural licuado
GW	gigawatts
GWh	gigawatts-hora
ha	hectárea
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)

kWh	kilowatt-hora
LyFC	Luz y Fuerza del Centro
mbd	millón de barriles por día
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MEDEC	México: Estudio sobre la Disminución de Emisiones de Carbono
Mm <sup>3</sup>	millón de metros cúbicos
mpcd	millón de pies cúbicos por día
Mt	millón de toneladas
MW	megawatt
NOX	óxido de nitrógeno
PECC	Programa Especial de Cambio Climático
Pemex	Petróleos Mexicanos
PIB	producto interno bruto
PICC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
PIDIREGAS	Proyectos de Impacto Diferido en el Registro del Gasto
PIE	productor independiente de energía
PJ	Petajoule
PM2.5	partículas finas de 2.5 micrómetros de diámetro y menores
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PPP	Purchase power parity (paridad de poder de compra)
PROCEDE	Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares
REDD	reducción de emisiones producidas por la deforestación y degradación de los bosques
SENER	Secretaría de Energía
SO <sub>2</sub>	dióxido de azufre
SO <sub>4</sub>	sulfato
SUV	sport utility vehicle (vehículo deportivo utilitario)
t	tonelada
T <sub>MS</sub>	tonelada de materia seca
TNM	transporte no motorizado
TWh	teravatio-hora
UMA	Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre
USAID	United States Agency for International Development (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional)
USCUSS	uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura

(Todas las cantidades se expresan en dólares de Estados Unidos, a menos que se indique otra cosa.)

## Resumen ejecutivo

**E**l Programa Especial de Cambio Climático (PECC), publicado en agosto de 2009, define el plan de acción de largo plazo de México sobre cambio climático, así también como las metas de mediano plazo en lo que hace a las medidas de adaptación y mitigación. El propósito del presente estudio –*México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono* (MEDEC)– es contribuir a la ejecución del mencionado plan de acción de largo plazo.

El estudio contempla la evaluación del potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en México durante los próximos 20 años. La evaluación también comprende el uso de una metodología común respecto de las intervenciones para reducir las emisiones de carbono en los sectores clave que las producen en México. Teniendo en cuenta las intervenciones que fueron evaluadas, el estudio desarrolla un escenario para la disminución de las emisiones de carbono hasta el año 2030.

### Los beneficios de dirigirse hacia una economía de bajas emisiones

La reducción de las emisiones de GEI es de fundamental importancia para México, no sólo para enfrentar el cambio climático, sino también para facilitar el desarrollo económico, énfasis clave de la ENACC. Los beneficios para México resultantes de dirigirse hacia una economía de bajas emisiones podrían traducirse básicamente en cuatro aspectos:

- Puesto que existe la probabilidad de que sufra desproporcionadamente los impactos del cambio climático (sequía, aumento del nivel del mar, tormentas tropicales con mayor grado de severidad), México tiene sumo interés en convertirse en un participante importante de un acuerdo internacional que establezca un límite para este tipo de emisiones.
- Varias intervenciones “ganar-ganar” de bajas emisiones (intervenciones que tienen tasas de retorno económicas positivas y que deben llevarse a cabo independientemente de las consideraciones sobre cambio climático) pueden contribuir significativamente al desarrollo económico de México.

Numerosas son las intervenciones de bajas emisiones que tienen importantes cobeneficios para México, como los beneficios en términos de seguridad energética asociados con el uso eficiente de energía (tanto en el sector de oferta como en el sector de demanda de energía) y con proyectos de energías renovables; los beneficios para la salud humana resultantes del transporte y de otras intervenciones que reducen los contaminantes del aire a nivel local; y los beneficios para la protección del medio ambiente, que se pueden lograr a través del manejo sustentable de los bosques y de otros recursos naturales, los programas de reducción de desechos y las menores emisiones de contaminantes locales provenientes de las instalaciones del sector energía.

Es probable que los países que avanzan hacia un desarrollo de bajas emisiones, a través de la transferencia de recursos financieros en el mercado del carbono y de los nuevos programas públicos que propenden por la mitigación del cambio climático, cosechen ventajas estratégicas y competitivas.

### Opciones de mitigación por sector

El estudio MEDEC contempló la evaluación de las intervenciones de bajas emisiones en cinco sectores: electricidad, petróleo y gas, uso final estacionario de energía, transporte y el sector agrícola y forestal. Para seleccionar las intervenciones, se aplicaron tres criterios:

- Las intervenciones debían tener un potencial considerable para reducir las emisiones de GEI. El umbral para incluir una intervención fue 5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes (MtCO<sub>2</sub>e) en el período de implementación 2009-30.
- Las intervenciones debían tener costos económicos y financieros bajos. Se le daba máxima prioridad a las intervenciones “ganar-ganar”. También se incluyó un segundo grupo de proyectos, con costos de carbono de \$25/tCO<sub>2</sub>e o inferiores.
- Las intervenciones debían ser factibles en el corto o mediano plazo. A fin de asegurar que se cumpliera con este criterio, fue necesario investigar las barreras de información, regulatorias e institucionales que impiden la adopción en gran escala de las intervenciones de bajas emisiones. En primer lugar, expertos del sector determinaron la factibilidad de las intervenciones y luego se realizó un análisis con funcionarios del gobierno y expertos internacionales en la materia. Todas las intervenciones definidas en el MEDEC ya se han implementado, al menos a nivel de proyecto piloto, en México o en otros países donde imperan condiciones similares. Algunas intervenciones enfrentarán barreras en el corto plazo (próximos cinco años), pero se sostiene que las barreras que impiden su adopción son superables en el mediano plazo.

## Electricidad

La demanda de energía eléctrica en México ha crecido más rápido que el PIB durante las últimas décadas, y es probable que esta tendencia continúe. En un escenario de línea base, satisfacer la demanda creciente de electricidad incrementaría las emisiones totales de GEI provenientes de la generación de electricidad en un 230% entre 2008 y 2030 (de 142 MtCO<sub>2</sub>e a 322 MtCO<sub>2</sub>e). La generación de energía eléctrica con carbón y con turbinas a gas se incrementaría en este escenario, correspondiendo al carbón el 37% de la capacidad nueva instalada y el 25% al gas natural.

Suponiendo un costo neto de CO<sub>2</sub>e de tan sólo \$10/tonelada, otras tecnologías de generación de electricidad de bajas emisiones –generación hidráulica de pequeña escala, eólica, biomasa, geotérmica, cogeneración (es decir, la generación de calor y electricidad en la misma instalación)– podría reemplazar gran parte de la generación con combustibles fósiles (principalmente carbón, pero también gas natural) en el escenario de línea base. En el escenario MEDEC de bajas emisiones, la participación de la electricidad generada con carbón caería del 31 al 6%, y aumentaría considerablemente el aporte de las tecnologías de bajas emisiones, incrementándose del 1,4 al 6,0% para la energía eólica, del 2 al 11% para la energía geotérmica, del 0,1 al 8,0% para la energía de la biomasa, y del 14 al 16% para la generación hidráulica. A costos netos inferiores a los costos marginales de la generación de electricidad en México, la cogeneración suministraría el 13% de la nueva capacidad eléctrica en el escenario MEDEC. Los costos de disminución se calcularon comparando los costos netos (incluyendo capital, combustibles y costos de operación y mantenimiento) de cada una de las tecnologías de bajas emisiones con los costos de la capacidad desplazada con base en carbón y gas natural.

Es necesario realizar varios cambios en las políticas y mecanismos regulatorios a fin de ampliar la participación de la electricidad generada por fuentes renovables y la eficiencia en el sector eléctrico. Si bien los costos de la generación eoloelectrónica se encuentran entre los más bajos del mundo –por la alta calidad de los recursos eólicos del Istmo de Tehuantepec, en donde varios proyectos eólicos están en construcción o en desarrollo–, los enormes recursos eólicos con que cuenta el país no han sido suficientemente desarrollados. Entre los factores que impiden el desarrollo de la energía eólica y de otras fuentes renovables se encuentran el hecho de que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) históricamente no ha tomado en cuenta las externalidades de la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en su proceso de planeación y ha asignado a estas tecnologías precios bajos, la falta de un instrumento para considerar el efecto del portafolio energético en la planificación del sector eléctrico –que incrementaría la participación de las intervenciones de energías renovables debido a la menor volatilidad de sus costos–, y la incapacidad de adaptar los procedimientos de adquisiciones a las particularidades de los proyectos de energías renovables. Es necesario definir nuevos procedimientos de contratación para los proyectos de cogeneración y otros de pequeña escala, a fin de reducir los riesgos y costos de transacción de los pequeños productores.

### *Petróleo y gas*

En el sector petróleo y gas de México hay un importante potencial para reducir las emisiones de GEI desarrollando intervenciones “ganar-ganar” e intervenciones de bajo costo. En particular, el importante potencial para la cogeneración en las instalaciones de Pemex podría proveer más del 6% de la actual capacidad eléctrica instalada de México.

Entre las intervenciones específicas que pueden reducir las emisiones de GEI y que tienen buenas tasas de retorno económicas están reducir las pérdidas en el sistema de distribución de gas, aumentar la eficiencia en las instalaciones petroleras, gaseras y de refinación de Pemex, y hacer realidad el potencial de cogeneración en las seis refinерías y cuatro plantas petroquímicas de Pemex. El desarrollo de este potencial exigirá un marco regulador que permita y fomente la venta de energía y capacidad excedentes a la red eléctrica.

A pesar de sus excelentes tasas de retorno, las inversiones en cogeneración y reducción de pérdidas de gas son menos atractivas para Pemex que las inversiones en exploración y desarrollo. El financiamiento de la inversión también es difícil por dos razones. En primer lugar, el elevado endeudamiento de Pemex –el más alto de cualquier compañía petrolera en el mundo en el 2007– ha dificultado la explotación de los mercados comerciales de crédito bajo términos razonables. Este problema es más difícil aún por la reciente crisis financiera internacional, no obstante las medidas para reformar la industria petrolera que se acaban de aprobar. En segundo lugar, si bien la industria petrolera representa solamente alrededor del 6% del PIB, los ingresos petroleros corresponden a más de un tercio del presupuesto federal de México. Esto impide al gobierno adoptar medidas que impliquen reducir los pagos de impuestos de Pemex en el corto plazo. Las medidas que permitan los contratos con el sector privado para la realización de proyectos de cogeneración y para reducir el venteo y la quema de gas podrían reducir los requerimientos de inversión de parte del sector público.

Si bien el escenario MEDEC reduce la demanda de gas natural en comparación con la línea base, tanto MEDEC como otros estudios realizados recientemente prevén un significativo incremento en el monto absoluto del consumo de gas natural. Por lo tanto, es sumamente importante que el plan del gobierno destinado a ampliar la producción de gas natural tenga éxito.

### *Uso final de la energía*

Desde 1995, la demanda de electricidad en México ha crecido a un ritmo superior al 4% anual. La gestión de este crecimiento a través de medidas de uso eficiente de energía en los sectores de consumo final será fundamental para mitigar las emisiones de GEI.

Más de la mitad del uso industrial de energía tiene lugar en tres subsectores: cemento, siderurgia y químico y petroquímico. Muchas de las industrias de materiales básicos de gran escala de México, incluyendo siderurgia y cemento, se encuentran entre las más eficientes del mundo. El problema radica en que gran parte del sector industrial está compuesto por pequeñas y medianas empresas que a menudo utilizan equipos obsoletos y no tienen acceso al conocimiento técnico ni al financiamiento para realizar mejoras. Estas empresas son relativamente intensivas en un alto uso de la electricidad. Las principales fuentes de ahorros de energía en el sector industrial provienen de las mejoras realizadas en cuanto a la eficiencia del uso de energía en motores, calderas de vapor y hornos, y también provienen de sistemas de cogeneración, cuyo potencial se ha aprovechado en menos del 15%.

El aire acondicionado, la refrigeración y los productos electrónicos serán las áreas principales en las cuales crecerá la demanda de electricidad en el sector residencial en México. Las tasas de saturación de los acondicionadores de aire en México alcanzaron aproximadamente el 20% en 2005, muy por debajo de las tasas del 95% de regiones de los Estados Unidos con similares grados-días de enfriamiento. La tasa de saturación de los refrigeradores es relativamente alta en México –alcanzó el 82% en 2006–, pero se espera aún un incremento considerable. No obstante los esfuerzos recientemente realizados para promover el uso de lámparas fluorescentes compactas, las lámparas incandescentes representan aproximadamente el 80% de las lámparas en uso en el sector residencial en México, siendo ello una señal del gran potencial que existe para ampliar los esfuerzos del plan de reemplazo de lámparas. También existe un potencial de mitigación significativo para calentar agua en las zonas urbanas a través del uso de la energía solar y para las estufas o cocinas de leña mejoradas en las zonas rurales.

Las políticas para mejorar la eficiencia energética en los sectores residencial, comercial y público –que incluyen normas de eficiencia más estrictas y con un mejor cumplimiento para alumbrado público, aire acondicionado, refrigeración y edificios– serán fundamentales para limitar las emisiones de GEI. Tal como lo demuestra el análisis, la inversión requerida en todas las intervenciones de eficiencia en el uso de la electricidad es significativamente menor que la inversión en plantas generadoras de electricidad que de lo contrario serían necesarias.

### *Transporte*

El sector transporte es el de mayor envergadura y rápido crecimiento en lo que respecta al consumo de energía y a las emisiones de GEI en México, y el transporte por carretera representa aproximadamente el 90% de las emisiones. Entre 1996 y 2006, el parque automotor de México casi se triplicó, pasando de 8 millones de vehículos a más de 21 millones. El incremento en el uso de energía por parte del transporte por carretera se cuadruplicó entre 1973 y 2006. La importación de vehículos usados

procedentes de los Estados Unidos ha sido un factor importante detrás del crecimiento del parque automotor, lo que también ha llevado a un incremento en la edad promedio de dicho parque y a motivos de preocupación en cuanto al bajo promedio de kilómetros recorridos por litro de gasolina y al alto nivel de emisiones de gases y partículas contaminantes.

Se evaluaron varias intervenciones interrelacionadas que reducen las emisiones de GEI en el sector transporte. Las mismas comprendieron incrementar la densidad del desarrollo urbano, elevar las normas de eficiencia energética para los vehículos nuevos, optimizar las rutas para el transporte colectivo, crear un sistema de transporte tipo BRT, fomentar el transporte no motorizado, exigir la verificación o inspección de los vehículos actualmente en uso en las principales ciudades, aplicar restricciones a la importación de vehículos mediante la verificación, coordinar el transporte de carga por carretera, y promover el transporte ferroviario de carga.

Dado el patrón de urbanización histórico y proyectado en México, el transporte urbano y los problemas relacionados de planificación del uso del suelo serán un componente fundamental en el uso total de energía por parte del sector transporte y las emisiones resultantes. El análisis revela la importancia de resolver los problemas del transporte en forma integrada y programática en vez de adoptar medidas individuales. Las intervenciones con el potencial más vasto que son más costo-efectivas son aquellas que incrementan el porcentaje de viajes en transporte público y aquellas que mejoran la eficiencia del parque automotor. El incremento del uso del transporte público –inclusive a través de concesiones privadas– requerirá el desarrollo de mecanismos que integren las acciones de transporte público y de desarrollo urbano tanto del gobierno federal como de los gobiernos municipales. La promoción de políticas de transporte más sostenibles puede redundar en numerosos cobeneficios sumados a la mitigación del cambio climático, incluyendo la disminución de la congestión (y los correspondientes ahorros de tiempo de viaje) y mejoras en la salud pública como resultado de un menor nivel de contaminación del aire.

### *Sector agrícola y forestal*

El sector agrícola y forestal es uno de los sectores clave en el que se pueden reducir las emisiones de GEI en México. Las intervenciones mencionadas en el estudio MEDEC se basan en un modelo geográfico que determinó las áreas que pueden dedicarse a varias actividades rurales, reduciendo al mínimo los posibles impactos negativos sobre la producción de alimentos y la conservación de la biodiversidad. Las intervenciones en el subsector forestal –incluyendo la reforestación, plantaciones comerciales y medidas para reducir las emisiones producidas por la deforestación y degradación de los bosques (REDD)– representan el 85% de las medidas de mitigación propuestas en el sector agrícola y forestal. Las mismas se encuentran entre las opciones más importantes de

mitigación para México. Las intervenciones en este sector que cuentan con los beneficios más altos son aquéllas que sustituyen el uso de combustibles fósiles mediante la producción sostenible de energía de la biomasa, a la vez que reducen la deforestación y degradación de los bosques.

Muchas de las intervenciones en el subsector forestal tienen beneficios ambientales no cuantificados, como la conservación del suelo, las mejoras en la calidad del agua y la preservación de los ecosistemas, además de beneficios cuantificados relacionados con la generación de ingreso y empleo para las comunidades rurales. El éxito de la ampliación de las intervenciones en el subsector forestal en México depende de los cambios institucionales que se adopten en el manejo forestal, el mejoramiento de los mecanismos de financiamiento público y el desarrollo de un mercado para los productos forestales sostenibles.

Las medidas más costo-efectivas para reducir las emisiones de GEI provenientes del sector agricultura son más limitadas, en parte por la falta de investigación y desarrollo de las medidas de bajas emisiones. Sin embargo, la labranza mínima para la producción de maíz –que requiere menos energía y parece facilitar el secuestro de carbono en el suelo– pareciera ser una tecnología prometedora.

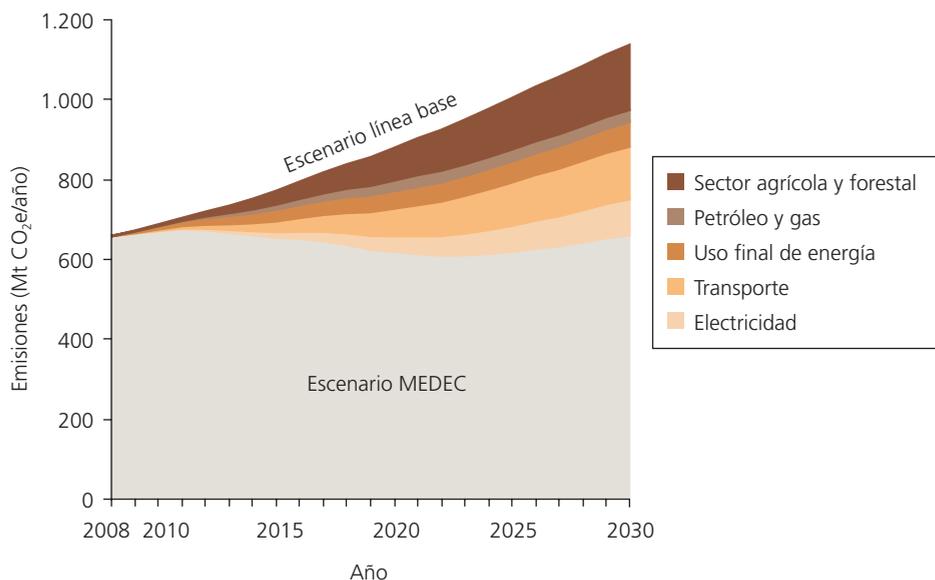
El etanol producido a partir de la caña de azúcar tiene un significativo potencial para la reducción de GEI, si bien el nivel de productividad de la producción de caña de azúcar en México es actualmente bajo (los costos de producción son considerablemente superiores a los precios del azúcar en el mercado mundial). Se estima que otras intervenciones con biocombustibles líquidos –etanol producido del sorgo y biodiesel producido del aceite de palma y de la jatropha– tienen un potencial limitado para la reducción de GEI sin incidir en el uso del suelo para cultivos alimentarios, bosques o conservación de ecosistemas.

### Reducciones de emisiones asociadas con un escenario de bajas emisiones

La línea base se definió utilizando el modelo LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) con base en supuestos macroeconómicos para el PIB, el crecimiento poblacional y los precios de los combustibles, que están en línea con las estimaciones del gobierno mexicano de principios del 2008. En este escenario, se considera que las emisiones totales de GEI crecerán de 659 Mt CO<sub>2</sub>e en 2008 a 1.137 Mt en 2030.

La implementación de las 40 intervenciones del MEDEC que cumplen con los criterios definidos para su inclusión, reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub>e en aproximadamente 477 Mt para el 2030 respecto de la línea base (gráfico 1). La adopción de estas intervenciones produciría un nivel de emisiones que es prácticamente el mismo que el de 2008, a pesar de un PIB e ingreso per cápita considerablemente más elevados. Las reducciones de las emisiones provendrían del sector agrícola y forestal (162 Mt),

**Gráfico 1** Línea base y emisiones de GEI proyectadas según el escenario MEDEC, por sector, 2008-30



Fuente: autores.

transporte (131 Mt), generación de electricidad (91 Mt), uso final de energía (63 Mt), y petróleo y gas (30 Mt). El potencial para la reducción de emisiones del escenario MEDEC es conservador, dado que solamente se consideraron 40 intervenciones y el análisis no supuso ningún cambio importante en tecnología.

¿Cuánto costaría en México un desarrollo de bajas emisiones, y cuáles serían los costos de las intervenciones en cada sector? Casi la mitad de la reducción potencial de emisiones proviene de las intervenciones que tienen beneficios netos positivos (costos negativos), lo que quiere decir que su costo total es inferior a la alternativa de altas emisiones de carbono (gráfico 2). Entre las intervenciones que tienen un potencial alto y un costo bajo se encuentran las siguientes:

- Transporte público y eficiencia de vehículos.
- La mayor parte de las medidas de eficiencia energética, incluyendo mejoras de eficiencia en la generación, transmisión y distribución de electricidad, alumbrado público, refrigeración, aire acondicionado y estufas de leña mejoradas.
- Varias opciones de suministro de energía a bajo costo, como la cogeneración en industrias (y en Pemex) y el calentamiento solar de agua.

A un valor de \$10/t CO<sub>2</sub>e, varias otras intervenciones de envergadura, incluyendo reforestación y restauración y plantaciones, rinden beneficios positivos. El 80% del potencial de reducción de GEI de las intervenciones establecidas en el estudio MEDEC está por debajo del nivel de \$10/t CO<sub>2</sub>e. Elevar el umbral del costo a \$25/t CO<sub>2</sub>e permite que se eviten más de 5.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e hasta el año 2030.

## Elementos del programa de bajas emisiones

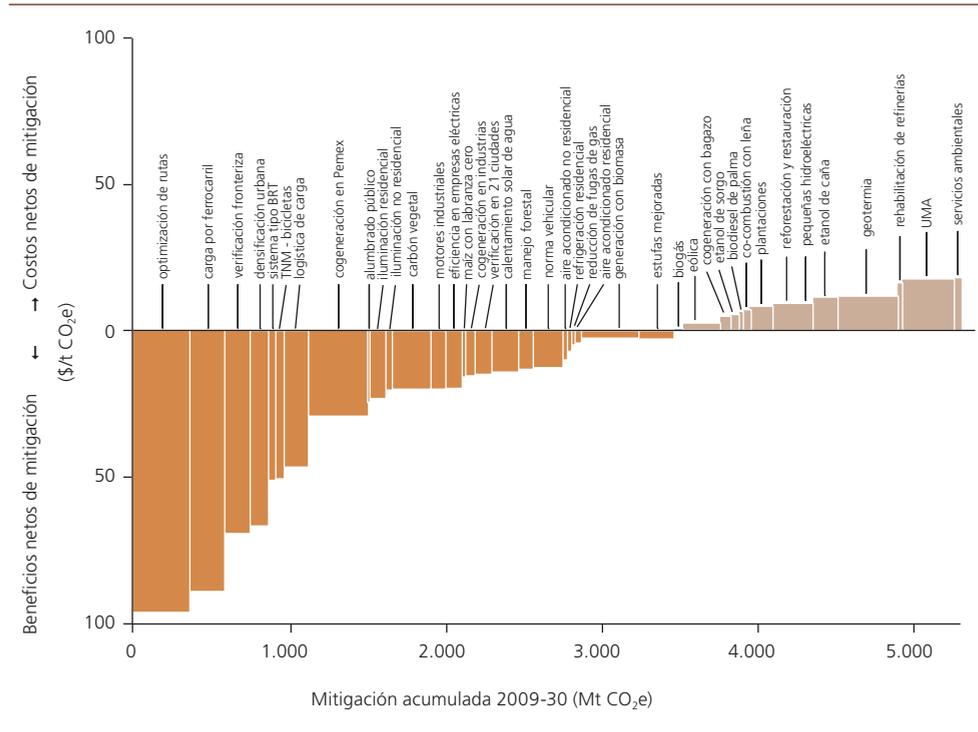
Muchas intervenciones de alta prioridad en los sectores transporte, electricidad, eficiencia energética y silvicultura tienen costos netos que son bajos o negativos. El hecho de que muchas de estas intervenciones aún no hayan sido adoptadas en gran escala sugiere que existen barreras para su implementación.

### *Políticas e inversiones requeridas para el desarrollo de bajas emisiones*

Dos de los desafíos más grandes que México enfrentará al dirigirse hacia una economía de bajas emisiones son el financiamiento de los costos iniciales (generalmente más altos) de las inversiones de bajas emisiones y la puesta en marcha de políticas y programas de apoyo para vencer las barreras de tipo regulatorio, institucional y de desarrollo de mercados. Estos costos a menudo son compensados por costos operativos más bajos que producen un beneficio neto económico (en términos de valor presente). No obstante, aún en los casos donde los costos actualizados del ciclo de vida son más bajos, los costos iniciales de inversión más altos con frecuencia inhiben la materialización de estas inversiones. Para algunas intervenciones, en particular en lo que hace al uso eficiente de energía, la inversión inicial se compensa con los ahorros correspondientes en nueva capacidad de generación, llevando a diferencias del costo de inversión “negativas” cuando se tienen en cuenta los efectos aguas arriba o *upstream*. La inversión nueva total requerida para alcanzar el escenario MEDEC de bajas emisiones asciende aproximadamente a \$64.000 millones entre 2009 y 2030, o alrededor de \$3.000 millones por año, equivalentes a aproximadamente el 0,4% del PIB de México en 2008.

La inversión por parte del sector público será fundamental, pero el financiamiento no tendrá que provenir en su totalidad del gobierno; hay espacio suficiente para involucrar al sector privado en las inversiones para financiar la eficiencia energética, las energías renovables y el transporte sostenible. La reciente reforma petrolera representa un paso positivo en la promoción de un mayor nivel de eficiencia en el sector y en la atracción de inversiones provenientes del sector privado. Desde mediados de la década de 1990 se ha producido un incremento espectacular en la cantidad de productores independientes de electricidad a partir de centrales eléctricas a gas natural. Este modelo podría mejorarse y ampliarse con el propósito de promover la inversión en la eficiencia energética, la cogeneración y el aprovechamiento de energías renovables.

Gráfico 2 Curva de costos marginales de abatimiento



Fuente: autores.

La modificación de las normas que limitan a Pemex para que explote su potencial de cogeneración y aporte una sustancial producción de electricidad a la red es de alta prioridad para el desarrollo de bajas emisiones. Otras políticas importantes podrían ser incrementar las normas de eficiencia energética para vehículos usados y nuevos; revisar las tarifas residenciales de electricidad y aumentar los precios de los productos petrolíferos y del gas natural; modificar las reglas para las adquisiciones del gobierno a fin de facilitar las inversiones en eficiencia energética en escuelas, hospitales, edificios gubernamentales y servicios municipales; mejorar la coordinación entre los gobiernos federal, estatales y municipales y entre los organismos en todos los niveles de gobierno que se relacionen con la planificación urbana del uso del suelo y el transporte público; mejorar la calidad de los combustibles y aplicar normas para la calidad del aire, y ampliar los programas de manejo forestal.

Casi todas las intervenciones definidas en el estudio MEDEC ya se han implementado en México como proyectos de inversión a escala comercial o programas pilotos, demostrando de esta forma la factibilidad de su implementación en el corto plazo. Para

muchas de las intervenciones, lo que se necesita es pasar de la escala de un proyecto individual a un programa más amplio. La ampliación de estos proyectos exigirá políticas nuevas y el financiamiento de inversiones incrementales, así como otros cambios institucionales y de conducta.

Algunas de las intervenciones establecidas en el estudio MEDEC podrían contar con el aporte provisto por los recursos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) u otros mecanismos internacionales de financiamiento para reducir las emisiones de carbono.

### *Prioridades a corto plazo*

Varias intervenciones de bajas emisiones se podrían implementar en México en el corto plazo. Las acciones de alta prioridad que ya se han implementado en México y que podrían ampliarse en los próximos cinco años comprenden lo siguiente:

- Sistemas de transporte tipo BRT, con base en proyectos llevados a cabo en México y en otras partes de Latinoamérica.
- Ampliación de los programas de iluminación y de aparatos electrodomésticos eficientes desarrollados por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) y la Secretaría de Energía (SENER).
- Desarrollo de la energía eólica en Oaxaca y en otros lugares, con base en los proyectos piloto de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Deforestación evitada, con base en el proyecto Los Tuxtlas en Veracruz.
- Cogeneración en las instalaciones de Pemex, con base en el proyecto de Nuevo Pemex.

En donde sea que comiencen los proyectos de desarrollo de bajas emisiones en México, habrá necesidad de experimentar y adquirir experiencia, especialmente en lo que se refiere a los nuevos mecanismos de inversión e instrumentos regulatorios. Para crear el apoyo a nivel nacional para un programa de bajas emisiones, México debe comenzar con medidas que tengan tasas de retorno económicas positivas. Tal como lo demuestra el análisis, tales intervenciones son abundantes. Una segunda prioridad es promover las intervenciones que tienen beneficios sociales y ambientales positivos, tales como aquéllas con externalidades ambientales positivas en el subsector forestal y aquéllas que reducen la contaminación del aire a nivel local y los impactos sobre la salud, ya sea a través del transporte sostenible o del mejor uso de la leña en comunidades rurales.



# 1

## Introducción

El 25 de mayo de 2007, el Presidente Felipe Calderón presentó la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC) de México; esta estrategia colocó al cambio climático en el centro de la política nacional de desarrollo del país (SEMARNAT, 2007). La ENACC estableció un primer esbozo de plan de acción de largo plazo sobre el cambio climático para México, así como las metas de mediano y largo plazo relacionadas con las medidas de adaptación y mitigación. El 28 de agosto de 2009, México publicó el Programa Especial de Cambio Climático (PECC). De igual modo que con todos los programas gubernamentales, el PECC se considera parte del Plan Nacional de Desarrollo 2007-12 (PND), y un elemento integral del pilar de la sostenibilidad ambiental del PND.<sup>1</sup> El PECC definirá las modalidades para hacer que la ENACC sea operativa durante los próximos tres años, en particular mediante la identificación de las prioridades y de fuentes de financiamiento, tanto nacionales como internacionales (PECC, 2009). El presente estudio fue diseñado y ha sido realizado con el propósito de contribuir al plan de acción de México sobre mitigación del cambio climático.

### Objetivos del estudio

El presente estudio *México: Estudio sobre la Disminución de Emisiones de Carbono* (MEDEC) procura identificar y evaluar las opciones de bajo costo para reducir las emisiones de GEI que México puede implementar en el corto y mediano plazo. Los objetivos específicos comprenden lo siguiente:

- 
- 1 El principal objetivo de este pilar es volcar el concepto de sustentabilidad ambiental en un elemento transversal de políticas públicas y asegurar que todas las inversiones públicas y privadas sean compatibles con la protección del medio ambiente. Los objetivos y estrategias están organizados en áreas como agua, bosques, cambio climático, biodiversidad, residuos sólidos e instrumentos de políticas de sostenibilidad ambiental para los distintos sectores.

- Evaluar las intervenciones de bajas emisiones por parte de los sectores clave en México, utilizando una metodología común de análisis costo-beneficio (recuadro 1.1), e identificar las barreras que impiden la implementación de dichas intervenciones.

### Recuadro 1.1 Metodología de análisis costo-beneficio

El análisis económico de las intervenciones de bajas emisiones utiliza un marco estandarizado de evaluación de costo-efectividad para las intervenciones en todos los sectores. Desde el punto de vista técnico, la metodología no es propiamente un análisis costo-beneficio porque no mide los beneficios de la mitigación del cambio climático en términos de la reducción de los impactos de dicho cambio climático, sino que compara los costos de las diferentes intervenciones para reducir las emisiones de GEI. En otras palabras, el análisis económico no supone un valor para la mitigación de las emisiones de carbono, sino que, por el contrario, produce un “costo del carbono” como resultado. El análisis calcula el valor presente neto en el año 2008 de los costos y beneficios económicos directos de cada una de las intervenciones entre 2009 y 2030, para llegar a los “costos netos” de reducir las emisiones de carbono.

La costo-efectividad de la reducción de emisiones de GEI es así el valor presente del costo neto de reducir (evitar) una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente de emisiones. Para cada intervención durante el período comprendido por el estudio, se sumaron las reducciones anuales de las emisiones de carbono, mientras que el flujo de los costos netos anuales se actualizó con una tasa del 10% anual para determinar el valor presente del costo neto en el año 2008.

El costo neto de la intervención para mitigar el cambio climático se calcula restando los beneficios directos de los costos directos de implementación de la intervención. Los costos financieros reflejan los costos de oportunidad económicos (sociales) en la medida en que se hicieron correcciones para no incluir impuestos ni subsidios, y en que los bienes comercializados se evaluaron a sus valores de paridad de importación y exportación. Ejemplos de beneficios directos son los ahorros en los costos de la energía o los ahorros en los tiempos y en los costos de transporte. Las externalidades ambientales se consideran como cobeneficios indirectos y no están incluidas en el cálculo de primer orden de la costo efectividad que se muestra en la curva de costos marginales de abatimiento. Sin embargo, para algunas intervenciones en las que los beneficios para la salud resultantes de una menor contaminación del aire revisten particular importancia y se han estimado las funciones de daños –como transporte y uso doméstico de leña– se calcularon los valores de las externalidades (estos resultados se analizan en las secciones sobre los distintos sectores, en el capítulo 7, y en el recuadro 5.1).

En el análisis de las intervenciones individuales, las comparaciones se realizan entre la intervención y la línea base, alternativa que se hubiese seguido en ausencia del programa MEDEC. Los costos (o beneficios) incrementales netos se calculan restando los costos (beneficios) de la opción de los costos (beneficios) del caso base; y las emisiones incrementales netas de GEI se calculan restando las emisiones de GEI (toneladas de CO<sub>2</sub>e) de la opción de las emisiones de GEI del caso base. (Para una explicación más detallada del análisis costo-beneficio, ver apéndice B.)

- Preparar un escenario de bajas emisiones para México hasta el año 2030 basado en el potencial y los costos de las intervenciones de mitigación en los distintos sectores.
- Identificar las políticas prioritarias que servirían de soporte para un desarrollo de bajas emisiones, incluyendo un portafolio de intervenciones de bajas emisiones que se puedan implementar ahora y dentro de los próximos 5-10 años.

El estudio MEDEC se basa en la ENACC y en el programa de desarrollo de bajas emisiones esbozado en la Tercera Comunicación Nacional de México, con el propósito de proveer las herramientas para evaluar y priorizar las intervenciones y políticas de bajas emisiones en México. El estudio evalúa una amplia gama de actividades potenciales de bajas emisiones, comparando los resultados con las distintas experiencias a nivel internacional e identificando las ventajas estratégicas y competitivas del desarrollo de bajas emisiones para México, incluyendo las oportunidades para un mayor acceso al mercado del carbono y otros recursos para la mitigación del cambio climático.

El análisis se concentra en los sectores estratégicos o en los temas de importancia para México que fueron identificados en forma conjunta por el Banco Mundial y el Gobierno de México, a partir de consultas con distintos organismos gubernamentales, instituciones académicas y otras partes interesadas tanto del sector público como del sector privado. El nuevo trabajo de investigación realizado para el estudio tuvo por finalidad abarcar áreas en las cuales la información no abundaba y evitar la superposición con estudios y proyectos que se hubiesen desarrollado con anterioridad. El análisis de los distintos sectores comprende cinco temas:

- Generación de electricidad en centrales eléctricas centralizadas o descentralizadas.
- La industria del petróleo y gas, que incluye la explotación, ductos, refinerías y plantas de gas.
- Uso final de energía, que incluye eficiencia energética en las industrias manufacturera y de la construcción y en los sectores residencial, comercial y público.
- Transporte (el sector emisor más grande de GEI en México), que incluye principalmente al transporte por carretera.
- El sector agrícola y forestal, que comprende la producción de cultivos y madera, el manejo de bosques y de otros usos del suelo, y una amplia gama de tecnologías para el aprovechamiento de la energía de la biomasa.

El estudio también contempla la modelación económica y de emisiones y el análisis de escenarios, con el propósito de proveer una extensa perspectiva de oportunidades y metas alcanzables, desde una perspectiva internacional. La modelación utiliza los resultados del análisis de cada sector y desarrolla escenarios de emisiones de carbono hasta 2030.

El estudio contempla el análisis costo-beneficio de oportunidades específicas que reducen las emisiones de GEI en cada sector, los requerimientos financieros para la inversión en los distintos sectores, y los problemas relacionados con la implementación del portafolio de desarrollo de bajas emisiones. Las opciones de mitigación del cambio climático (conocidas como “intervenciones”) fueron seleccionadas con base en su potencial para la reducción de los GEI, los costos (o beneficios) netos y su factibilidad de implementación en términos de los prerrequisitos de tipo político, social, institucional, legal y de otro tipo. Las intervenciones identificadas se presentan por sector e individualmente, a fin de permitirle al gobierno o a otras instituciones que evalúen las implicaciones que tendrían las distintas combinaciones de actividades de reducción, en términos de costos de inversión y potencial de mitigación, así como para poder evaluar esto de manera flexible dentro del marco de las condiciones políticas, los recursos disponibles y otro tipo de consideraciones.

### Importancia estratégica para México del desarrollo de bajas emisiones

México, al dirigirse hacia una economía de bajas emisiones, se podría beneficiar por lo menos por cuatro razones:

- Existe la posibilidad de que sufra desproporcionadamente los impactos del cambio climático y, por lo tanto, tiene sumo interés en que se suscriba un acuerdo internacional que establezca un límite para las emisiones de carbono.
- Varias intervenciones “ganar-ganar” (es decir, intervenciones que tienen tasas de retorno económicas positivas y que deben llevarse a cabo independientemente de las consideraciones sobre cambio climático) pueden contribuir significativamente al desarrollo económico del país.
- Numerosas intervenciones producen cobeneficios importantes, como los beneficios relacionados con la seguridad energética, los beneficios para la salud humana y la protección del medio ambiente.
- Es muy probable que los países que avancen hacia un desarrollo de bajas emisiones cosechen ventajas estratégicas y competitivas.

México enfrenta grandes riesgos provenientes del cambio climático en relación con la disponibilidad de agua, la mayor frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales y las potenciales inundaciones en sus costas en ambos océanos. Inicialmente, se anticipó que el impacto del cambio climático se sentiría únicamente en el largo plazo; en la actualidad existe cada vez mayor evidencia de que los impactos del cambio climático ya están ocurriendo.

El Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC) predice que en los escenarios “más de los mismo” (*business as*

usual), con relación al período 1961-90, los aumentos de las temperaturas en la región de Latinoamérica y el Caribe podrían alcanzar 0,4°-1,8°C en 2020 y 1°-4°C en 2050 (De la Torre, Fajnzylber y Nash, 2009). Estas proyecciones, derivadas de los modelos de circulación global, también pronostican cambios en los patrones de las precipitaciones pluviales en toda la región (Christensen *et al.*, 2007). Las predicciones de por lo menos cinco de los ocho modelos climáticos globales señalan que para 2030 el número de días secos consecutivos en México se incrementará y que las olas de calor serán más extensas. Los pronósticos climáticos de mediano plazo indican que es probable que las regiones áridas del país sufran fuertes pérdidas de especies para 2050, al desaparecer el 8-26% de sus especies de mamíferos, 5-8% de sus especies de pájaros, y 7-19% de sus especies de mariposas (De la Torre, Fajnzylber y Nash, 2009).

El daño en los humedales de la costa del Golfo en México representa una seria preocupación. Los modelos de circulación global concuerdan que el Golfo de México es la zona costera más vulnerable en la región a los impactos del cambio climático; las tres comunicaciones nacionales de México presentadas ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) –en 2001, 2004, y 2007– documentan el daño en curso, planteando una urgente preocupación por la seguridad del área ante el cambio climático. Los humedales en esta región sufren actualmente los impactos producidos por el hombre, asociados con los cambios en el uso del suelo, la destrucción de los manglares, la contaminación y las derivaciones de ríos, que hacen que los ecosistemas sean aún más vulnerables a los impactos del cambio climático. El área total de manglares en la región de la costa del Golfo está desapareciendo a una tasa anual del 1-2,5%. Como resultado del cambio climático, México puede sufrir una disminución del 10-20% en el escurrimiento del agua en todo su territorio y de hasta el 40% en los humedales de la costa del Golfo. Estos humedales poseen el ecosistema más productivo del país y uno de los más ricos de la tierra (Vergara, 2008).<sup>2</sup> Aproximadamente el 45% de la producción de camarón, por ejemplo, tiene su origen en los humedales del Golfo, así como el 90% de la producción de ostión del país y por lo menos el 40% del volumen de la pesca comercial.

La información disponible también sugiere la existencia de una tendencia hacia la ocurrencia de tormentas y desastres naturales producidos por el cambio climático en México y en los países vecinos con mayor frecuencia y de mayor intensidad, o ambas a la vez. Los eventos climáticos extremos ocurridos ya dejaron un elevado número de muertos en la región. En 1998, el huracán Mitch causó la muerte de por lo menos

---

2 El Instituto Nacional de Ecología (INE) de México ha identificado los humedales del Golfo de México como uno de los ecosistemas más amenazado por los cambios climáticos que se prevé que ocurrirán. Este hecho se ha documentado en la Tercera Comunicación Nacional presentada por México ante la CMNUCC.

11.000 y quizás de hasta 19.000 víctimas en toda la región de América Central y México. En 2005, el huracán Wilma, el más devastador en la zona atlántica de que se tenga noticias, produjo daños que alcanzaron el 98% de las instalaciones de infraestructura a lo largo de la costa noreste de la Península de Yucatán en México, lugar donde está ubicada Cancún, y ocasionó una pérdida estimada en \$1.500 millones en la industria del turismo.

México espera poder beneficiarse estratégica y económicamente al dirigirse hacia una economía de bajas emisiones y al explotar las oportunidades y ventajas que se presentan localmente. Numerosas políticas y acciones se pueden adoptar para reducir las emisiones de GEI con el fin de incrementar la seguridad energética, mejorar la posición competitiva y la balanza comercial del país, y reducir el daño ambiental a nivel local.

Distintos estudios realizados con anterioridad al presente estudio han identificado varias áreas alentadoras para mitigar el cambio climático en México:

- Ampliar el nivel de eficiencia energética y el aprovechamiento y uso de energías renovables.
- Incrementar la producción de gas nacional y mejorar la eficiencia total del sector (incluyendo la reducción de las emisiones fugitivas y el venteo de gas), con el propósito de satisfacer la creciente demanda de gas natural del país, mejorar la calidad del aire localmente, incrementar el uso eficiente de energía en el sector eléctrico y la industria, y reducir la cada vez mayor dependencia de las importaciones de gas provenientes de los Estados Unidos.
- Evitar la deforestación e implementar proyectos de reforestación y de plantaciones, que pueden reducir las emisiones de GEI en México, al mismo tiempo que contribuyen a preservar la biodiversidad, a mejorar el manejo del agua y del suelo, y a lograr mejores condiciones de vida.

Los beneficios para México resultantes de adoptar una actitud más enérgica sobre el cambio climático y promover un desarrollo de bajas emisiones son competitivos y estratégicos. El gobierno federal, que ha asumido una posición proactiva en cuanto al cambio climático, reconoce estos beneficios.

## Emisiones de gases de efecto invernadero en México

México produjo 643 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalentes (Mt CO<sub>2</sub>e) en 2002 (Tercera Comunicación Nacional presentada ante la CMNUCC). Aproximadamente 390 Mt CO<sub>2</sub>e –es decir, el 61% del total de las emisiones de carbono– fueron generadas por la producción y consumo de energía a partir de combustibles fósiles, incluyendo las significativas emisiones producidas por las fugas (emisiones fugitivas,

venteo y quema de gas) en la producción y transporte del petróleo y gas. Las restantes emisiones de carbono provinieron del sector uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS) (14%); residuos (10%); procesos industriales (8%); y agricultura y ganadería (7%).

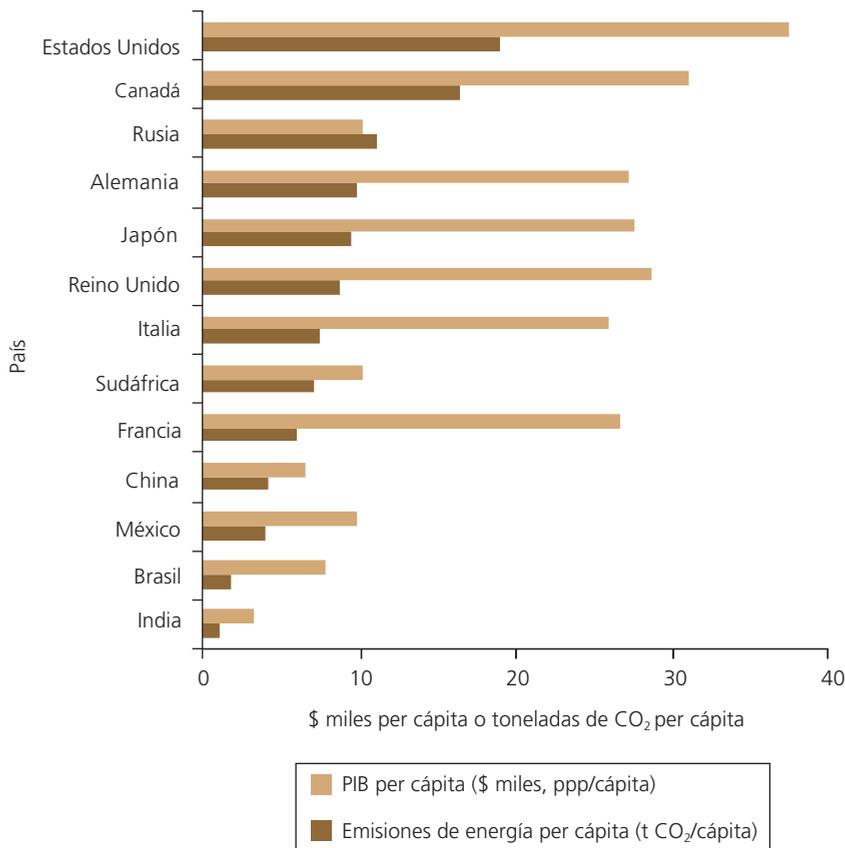
México ocupa el puesto número 13 en el mundo por las emisiones totales de GEI y es el segundo país emisor más grande de Latinoamérica después de Brasil. México responde por el 1,4% de las emisiones globales de estos gases producidas por el consumo de energía, es el emisor de GEI más grande de Latinoamérica si no se consideran las emisiones de carbono producidas por los cambios en el uso del suelo y por la deforestación. Las emisiones de GEI de México provenientes del consumo de energía son superiores a las de Brasil y Sudáfrica pero considerablemente menores a las de China o India. Las emisiones totales de GEI de México son equivalentes a aproximadamente 6 toneladas de CO<sub>2</sub>e per cápita; o alrededor de 4 toneladas de CO<sub>2</sub>e per cápita si se consideran sólo las emisiones de carbono producidas por la combustión de combustibles fósiles (gráfico 1.1).

Dejando de lado el sector USCUSS, para el cual las estimaciones de las emisiones de carbono son menos seguras que las correspondientes al consumo de energía, las emisiones de GEI de México se incrementaron el 30% entre 1990 y 2002 (gráfico 1.2). Las emisiones de carbono producidas por los residuos experimentaron el crecimiento más rápido, casi duplicando su volumen, impulsadas por el aumento de los residuos sólidos y aguas residuales. Las emisiones de carbono provenientes de los procesos industriales también crecieron significativamente, en gran medida por el auge de la construcción que tuvo lugar en este período, provocando el aumento del uso de la piedra caliza y dolomita, así como la producción de materiales de construcción, como cemento, hierro y acero. Las emisiones en el sector agrícola, que incluyen las emisiones de GEI producidas por el ganado, por los fertilizantes y por la liberación de carbono del suelo, disminuyeron en aproximadamente un 3% durante el mismo período, principalmente como resultado del menor nivel de utilización de fertilizantes.

Las emisiones de GEI generadas por las actividades de producción y consumo de energía crecieron a un ritmo constante entre 1990 y 2002, representando el 60% del aumento total de las emisiones de carbono (gráfico 1.3). El aumento en el consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad y para el transporte constituyó aproximadamente el 90% del incremento de los GEI asociados con la producción y el consumo de energía.

El sector USCUSS es una fuente importante de emisiones de GEI. Las estimaciones basadas en nuevos datos ubican a las emisiones netas de carbono de este sector en aproximadamente 103 Mt CO<sub>2</sub>e en 2005, un incremento considerable en comparación con las 90 Mt CO<sub>2</sub>e del inventario nacional de 2002. En el largo plazo, con

**Gráfico 1.1** Comparación de las emisiones de GEI y del PIB per cápita para los países del G8+5, 2003

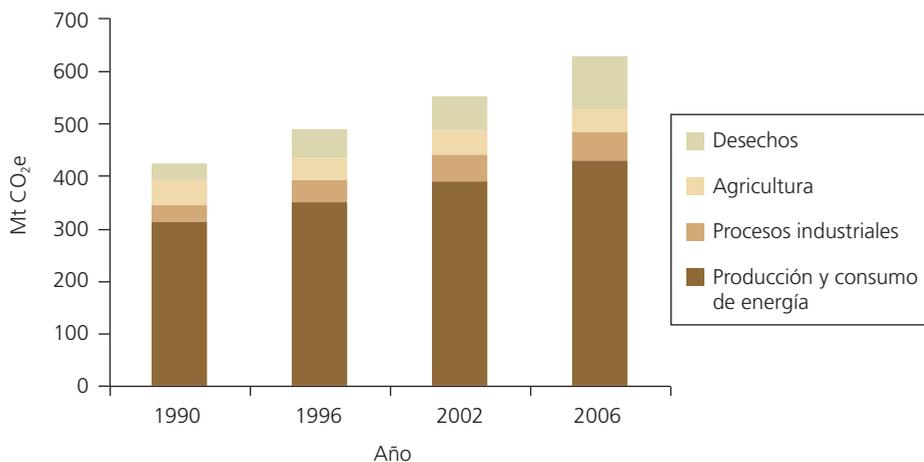


Fuente: IEA 2008b.

un mejor manejo forestal y un equilibrio entre la deforestación y la reforestación o plantaciones, el sector USCUS podría convertirse en un sumidero neto<sup>3</sup> de GEI en México.

- 3 La absorción y almacenamiento de carbono por parte de las plantas y del suelo se denomina a menudo “sumidero” de CO<sub>2</sub> proveniente de la atmósfera. Es así que, por ejemplo, si el volumen de carbono absorbido por los bosques es superior a las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de los mismos, como aquéllas resultantes de los incendios forestales o de la degradación del suelo, se dice que hay un sumidero neto de CO<sub>2</sub>.

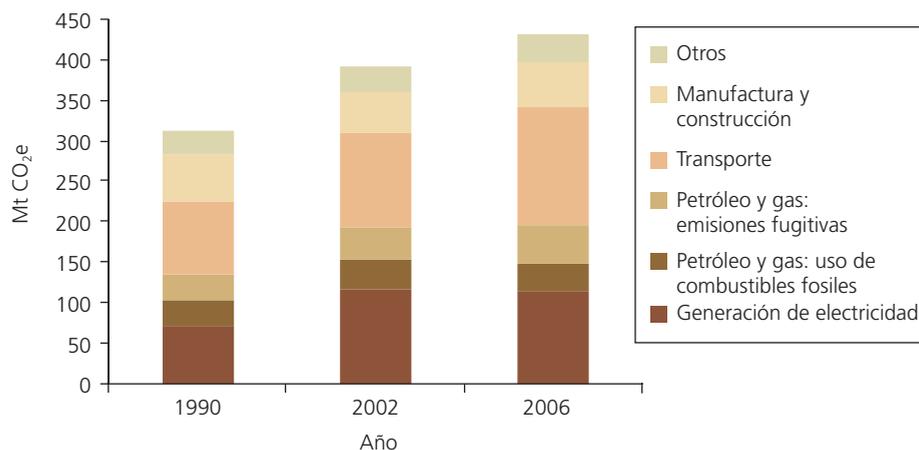
**Gráfico 1.2** Inventario de emisiones de GEI por fuente



*Fuente:* Los datos de 1990 a 2002 son de SEMARNAT e INE 2006a. Los datos de 2006 son preliminares y fueron proporcionados por el INE.

*Nota:* Los datos excluyen las emisiones relacionadas con el uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura; los datos de 2006 son preliminares.

**Gráfico 1.3** Emisiones de GEI procedentes de la producción y consumo de energía, por sector



*Fuente:* Semarnat e INE, 2006a; los datos de 2006 son preliminares. Los datos de 2006 son preliminares y fueron proporcionados por el INE.

*Nota:* Los datos excluyen las emisiones relacionadas con el uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura.

## Acciones sobre cambio climático de México

Al reconocer la amenaza que el cambio climático representa para su desarrollo, México se encuentra entre los países más activos en las discusiones que se llevan a cabo sobre el cambio climático. Como país no Anexo I,<sup>4</sup> México no está obligado a limitar o reducir sus emisiones de GEI según el Protocolo de Kioto, pero el país ha adoptado con firmeza el principio de la CMNUCC de “responsabilidades comunes pero diferenciadas” y se ha comprometido a reducir sus emisiones de carbono voluntariamente.

México ha presentado tres Comunicaciones Nacionales a la CMNUCC. La Primera Comunicación Nacional (1997) definió el inventario nacional de GEI e informó sobre los primeros estudios realizados sobre el grado de vulnerabilidad de México al cambio climático. La Segunda (2001) actualizó el inventario nacional de GEI para abarcar el período 1994-98 e incluyó los futuros escenarios para las emisiones de carbono. La Tercera Comunicación Nacional (2006) actualizó el inventario a 2002 e incluyó las estimaciones sobre las emisiones de carbono producidas por el cambio del uso del suelo para 1993-2002, así como varios estudios sobre mitigación y adaptación frente al cambio climático (SEMARNAP e INE, 1997; SEMARNAT e INE, 2001, 2006b.). México es el único país no Anexo I que ha presentado una Tercera Comunicación Nacional y actualmente está preparando su Cuarta Comunicación Nacional.

Al reconocer los desafíos multisectoriales que plantea el cambio climático, en abril de 2005 México creó la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC). Los mandatos clave de la CICC comprenden formular y coordinar las estrategias nacionales sobre cambio climático e incorporarlas en los programas de los distintos sectores.<sup>5</sup> La CICC tiene varios grupos de trabajo, incluyendo los grupos sobre mitigación y adaptación frente al cambio climático. Asociado con la CICC existe el Consejo Consultivo de Cambio Climático (C4) que establece el vínculo entre la CICC, la comunidad científica y la sociedad civil (*ver* <http://tinyurl.com/infoc4>).

- 4 Los países del Anexo I son signatarios de la CMNUCC (y del Protocolo de Kioto) que acuerdan reducir sus emisiones de GEI según las metas establecidas por la Convención. Los países no Anexo I comprenden los países en desarrollo y las economías en transición que no tienen metas obligatorias para reducir las emisiones de carbono según el Protocolo de Kioto.
- 5 La CICC está presidida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). El Subsecretario de Planeación y Política Ambiental es el Secretario Ejecutivo y los titulares de las siguientes áreas son miembros de esta comisión: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Secretaría de Economía (SE), Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Secretaría de Energía (SENER), y la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE). La Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) es un miembro invitado permanente en las deliberaciones de la CICC. Para mayores detalles, *ver* <http://tinyurl.com/infocicc>.

## Panorama general del análisis sectorial y estructura del informe

En los capítulos 2-6 se realiza la evaluación del potencial de la reducción de las emisiones de GEI en México por sector. Para propósitos del análisis, la economía se dividió en cinco sectores primarios: sector eléctrico; petróleo y gas; sectores de uso final estacionario de energía (incluyendo los sectores residencial, industrial, comercial y de servicios); transporte; y sector agrícola y forestal (incluyendo la energía de la biomasa). Estos sectores, elegidos según a su importancia respecto de las emisiones de carbono actuales y futuras proyectadas, comprenden más del 90% de las emisiones de carbono actuales de México.<sup>6</sup> El análisis por sector utiliza los informes detallados que se prepararon para el estudio MEDEC.

Cada análisis por sector se enfoca en un conjunto de intervenciones que reducirían las emisiones de GEI durante las próximas dos décadas. Las intervenciones se eligieron sobre la base de su potencial para la reducción global de esas emisiones, sus costos netos y la factibilidad para su implementación en el corto a mediano plazo (recuadro 1.2).

Se seleccionaron cuarenta intervenciones (cuadro 1.1). Muchas de ellas involucran a varios sectores u ocurren en un sector pero tienen efectos en otros sectores. En particular, varias intervenciones en los sectores industrial, petróleo y gas, y agrícola y forestal generan electricidad y por consiguiente mitigan la producción de GEI en el sector eléctrico. La mayoría de las intervenciones para el uso final eficiente de energía reducen el consumo de electricidad.

La mayor parte de las intervenciones en el sector agrícola y forestal reducen las emisiones de GEI mediante la “deforestación evitada” y acumulando activamente stocks de carbono en la biomasa leñosa y en los suelos. Otras intervenciones en el sector agrícola incluyen la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles líquidos, reduciendo las emisiones en el sector transporte. Algunas intervenciones forestales tienen impactos múltiples: producen energía de la biomasa que reemplaza el uso de combustibles fósiles en otros sectores, y contribuyen a reducir la deforestación y degradación de los bosques.

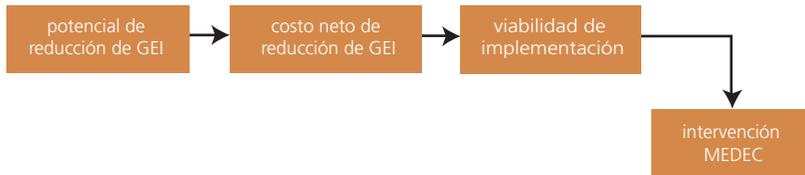
En los capítulos 2-6 se presentan los resultados del análisis detallado realizado por sector como parte del estudio MEDEC. Los resultados del análisis de las intervenciones de bajas emisiones para cada uno de los sectores se presentan de manera conjunta en el capítulo 7, conformando un escenario de desarrollo de bajas emisiones en México

---

6 Los sectores que no fueron incluidos en el estudio MEDEC son residuos y procesos industriales. En particular, las plantas de tratamiento de aguas residuales y los rellenos sanitarios tienen un potencial considerable para capturar gas metano y quemarlo o bien utilizarlo con fines energéticos.

### Recuadro 1.2 Criterios para seleccionar las intervenciones

Se utilizaron tres criterios principales para identificar las intervenciones de bajas emisiones que se incluirían en el análisis: el potencial para reducir las emisiones de GEI, el costo neto de hacerlo y la factibilidad de su implementación (gráfico del recuadro).



El primer criterio define que las intervenciones de bajas emisiones deben contar con un potencial considerable para reducir las emisiones de GEI. Para propósitos del presente estudio, se utilizó la cifra de 5 millones de toneladas (Mt) de CO<sub>2</sub>e de reducción de emisiones de carbono entre 2009 y 2030 como el nivel mínimo para que una intervención se incluyera en el estudio. Algunas intervenciones que no cumplían con el nivel mínimo de 5 Mt de CO<sub>2</sub>e pueden tener excelentes beneficios económicos y sociales y ser ejecutadas bajo los programas de reducción de carbono nacionales o internacionales. (Por ejemplo, la evaluación de la recolección y uso de los residuos bovinos o porcícolas mostró que esta intervención no satisfacía la meta mínima de reducción de emisiones de carbono. En México se están llevando a cabo varios proyectos que utilizan biogás a partir de residuos de animales, y varios de ellos tienen ingresos por bonos de carbono. Estos proyectos pueden ser excelentes para recibir apoyo bajo un programa de mitigación del cambio climático.) Dichas intervenciones no se incluyeron en el presente estudio.

El segundo criterio define que las intervenciones de bajas emisiones deben ser de bajo costo. Las intervenciones deben tener tasas de retorno económicas y sociales positivas (a una tasa de descuento o costo de capital dados). Muchas intervenciones tienen beneficios netos positivos. En estos casos la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es “gratis”, porque los otros beneficios financieros y económicos de la intervención más que cubren los costos correspondientes. A estos a menudo se los denomina proyectos “ganar-ganar”, porque la sociedad los debería implementar aún ante la ausencia de consideraciones climáticas. Otras intervenciones tienen costos netos. En estos casos, el costo por tonelada de CO<sub>2</sub>e debe ser bajo. Se utilizó un límite superior de \$25 por tonelada de CO<sub>2</sub>e para seleccionar estas intervenciones.

El tercer criterio es que las intervenciones de bajas emisiones deben ser factibles en el corto o mediano plazo. Este criterio es el que presenta el mayor desafío y requiere discusiones con expertos de los distintos sectores, funcionarios del gobierno y representantes del sector privado y de la sociedad civil. Para propósitos de la selección de las intervenciones del estudio MEDEC, su “factibilidad” fue determinada en primer lugar por los expertos de cada sector en términos de su potencial técnico, desarrollo de mercados y requerimientos institucionales. (Las intervenciones del estudio MEDEC dependen únicamente de tecnologías ya existentes; cualquier aumento en la productividad y la concomitante reducción de costos se originaría principalmente en los cambios en la escala de producción.) La mayor parte de las intervenciones seleccionadas se analizaron también con funcionarios del gobierno a fin de evaluar su factibilidad política e institucional en

*(Continúa en la página siguiente)*

*(Continuación recuadro 1.2)*

el contexto de México. (Todas las intervenciones del estudio MEDEC ya han sido implementadas, al menos a nivel de programa piloto, en México o en otros países con condiciones similares. Algunas intervenciones enfrentan barreras en el corto plazo, pero se estima que esas barreras se podrán eliminar en el mediano plazo.) Por último, las intervenciones fueron sometidas a revisión por parte de los funcionarios del Banco Mundial para asegurar que las medidas eran factibles en un contexto más amplio, desde una perspectiva del mercado y con respecto a los criterios de sostenibilidad, como las salvaguardas ambientales y sociales. (En los capítulos correspondientes a cada sector y en el capítulo final se analizan las barreras sociales, políticas, institucionales y financieras a las intervenciones de bajas emisiones y las políticas que se podrían aplicar para vencerlas.)

hasta 2030. Los costos relativos de las intervenciones se comparan en el capítulo 7 bajo la forma de una curva de costos marginales de abatimiento. El capítulo 8 detalla las conclusiones del análisis del escenario de bajas emisiones en términos de la factibilidad de implementar un programa de intervenciones y un portafolio de proyectos que podrían ejecutarse en el corto plazo.

Cuadro 1.1 Intervenciones del estudio MEDEC por Sector

Sector	Intervención	Reducción de emisiones				
		Electri- cidad	Calor	Trans- porte	Uso del suelo	Otros <sup>a</sup>
Electricidad	Energía eólica	■				
	Geotermia	■				
	Pequeñas hidroeléctricas	■				
	Biogás	■				
Petróleo y gas	Eficiencia en empresas eléctricas	■				
	Cogeneración en Pemex	■	■			
	Rehabilitación de refinerías	■	■			
Uso final de energía	Reducción de fugas en transporte de gas					■
	Cogeneración con bagazo		■			
	Cogeneración en industrias		■			
	Aire acondicionado residencial					
	Iluminación residencial					
	Alumbrado público					
	Motores industriales					
	Iluminación en edificios no residenciales					
	Aire acondicionado en edificios no residenciales					
	Refrigeración residencial					
	Calentamiento solar del agua					
	Estufas mejoradas de leña					
Transporte	Densificación urbana			■		
	Sistemas de transporte tipo BRT			■		
	Transporte no motorizado			■		
	Optimización de rutas de transporte público			■		
	Norma vehicular			■		
	Verificación vehicular en 21 grandes ciudades			■		
	Verificación vehicular fronteriza			■		
	Logística de carga por carretera			■		
Carga por ferrocarril			■			
Agricultura y silvicultura	Generación de electricidad con biomasa	■				■
	Co-combustión con leña	■				■
	Producción de carbón vegetal		■			
	Maíz con labranza cero		■			
	Reforestación y restauración					■
	Plantaciones					■
	Manejo de vida silvestre (UMA)					■
	Manejo forestal					■
	Pago por servicios ambientales					■
	Biodiesel de palma			■		
Etanol de sorgo			■			
Etanol de caña	■					

Fuente: autores.

a. "Otros" incluye procesos industriales, desechos, venteo y emisiones fugitivas.

## 2 Electricidad

El sector eléctrico de México es el segundo emisor de GEI más grande después del sector transporte, representando aproximadamente el 26% de las emisiones de estos gases originadas en la producción y consumo de energía (ver gráfico 1.3). Se estima que la producción de electricidad crecerá significativamente en México en las próximas décadas para satisfacer las necesidades de una economía en expansión y una población en crecimiento. La mezcla de tecnologías y de combustibles para la generación de electricidad tendrá un importante impacto en las emisiones de gases efecto invernadero producidas por el sector.

El sistema eléctrico mexicano está dominado por dos empresas estatales –Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Luz y Fuerza del Centro (LyFC)<sup>1</sup>– que están a cargo de la generación, transmisión y distribución de electricidad y prestan servicio a algo más del 97% de la población. CFE provee el servicio eléctrico a la mayor parte del país, excepto en la Ciudad de México y áreas circundantes, que están bajo el control de LyFC.

Desde mediados de la década de 1990, la nueva capacidad de generación ha sido suministrada principalmente por productores independientes de energía (PIE), que generan y venden electricidad en forma exclusiva a CFE bajo contratos de largo plazo. En 2007, los PIE representaron aproximadamente el 23% de la capacidad instalada total en México y generaron el 31% de la electricidad total. La capacidad instalada total del sistema eléctrico, incluyendo los proyectos de autoabastecimiento y exportación de electricidad, fue de 59.209 MW, y generó 262 TWh anuales.

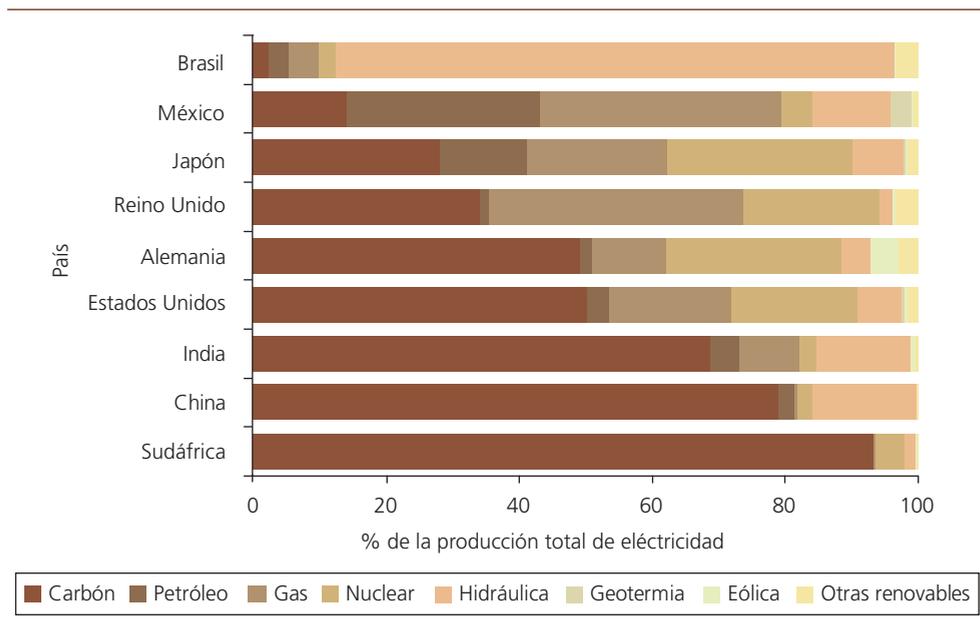
Alrededor del 76% de la capacidad instalada de generación de electricidad utiliza combustibles fósiles –combustóleo o *fuel oil*, gas natural, carbón y pequeños volúmenes de diesel. La capacidad restante está compuesta por energía hidráulica (19%), nuclear (2,3%), geotérmica (1,6%), bagazo de caña de azúcar y otra biomasa (0,6%), y una pequeña fracción de energía eólica.

El cambio más notable en el portafolio de generación de electricidad en la última década ha sido el gran incremento de las plantas generadoras que utilizan gas natural, que han reemplazado a las centrales eléctricas a base de combustóleo. El uso del gas na-

1 El 11 de octubre de 2009, LyFC fue liquidada e incorporada a CFE.

tural en el sector eléctrico creció a una tasa promedio anual de aproximadamente el 16% entre 1997 y 2007, alcanzando una capacidad instalada de aproximadamente 20.000 MW (excluyendo los proyectos de autoabastecimiento de electricidad). El consumo de gas natural por parte del sector eléctrico alcanzó los 27.300 Mm<sup>3</sup> en 2007, equivalentes al 38% del consumo de gas total del país (SENER, 2008b). Las centrales eléctricas de carbón comenzaron a formar parte de la mezcla de combustibles a principios de la década de 1980 y han crecido gradualmente hasta llegar al 7,9% de la capacidad instalada. A pesar de presiones por parte de la población y de las instancias regulatorias para reducir la utilización del carbón en algunos países industrializados y de ingresos medios sobre la base de consideraciones ambientales, la tendencia internacional global, impulsada por los costos de inversión y combustibles, es continuar la ampliación de la capacidad de generación de electricidad a base de carbón. La capacidad de generación de energía hidráulica de México se ha incrementado en 50% en términos absolutos durante las dos últimas décadas, pero su participación relativa en la capacidad total se desplomó del 30 al 19%. La enorme participación de la generación eléctrica a partir del gas y el considerable aporte de la hidroelectricidad contribuyeron al nivel relativamente bajo de emisiones de carbono en el sector eléctrico en México en relación con la mayoría de los países del G8+5 (gráfico 2.1).

**Gráfico 2.1** Generación de electricidad por tipo de fuente de energía en países seleccionados, 2005



Fuente: IEA, 2008a.

En 1997 el gobierno de México creó un mecanismo financiero –los Proyectos de Impacto Diferido en el Registro del Gasto (PIDIREGAS)– para financiar proyectos de petróleo, gas y electricidad a largo plazo con inversiones privadas garantizadas por el gobierno. Bajo este esquema de financiamiento y a través del financiamiento presupuestal tradicional, el incremento de la capacidad instalada superó los 15 GW entre 1999 y 2008, incluyendo 11 GW mediante contratos con PIE sobre la base de centrales eléctricas de ciclo combinado de gas natural. A partir de 2008, México contó con un excedente en su capacidad de generación de electricidad, con un margen operativo de reserva del 21% (siendo estándar internacional un 15%).

Las pérdidas técnicas en el segmento transmisión han estado disminuyendo en términos de porcentaje tanto para CFE como para LyFC, en parte como resultado de un ambicioso programa de inversión implementado en CFE y financiado a través del esquema PIDIREGAS. A partir del 2005, las pérdidas técnicas en el segmento transmisión fueron inferiores al 2% para CFE, que está en el mismo nivel que las buenas prácticas internacionales, y el 3% para LyFC (Komives *et al.*, 2009).

Por el contrario, las pérdidas en el segmento distribución son elevadas en ambas empresas según los estándares internacionales, y han estado creciendo en los últimos años. Las pérdidas técnicas y comerciales de CFE en el segmento distribución subieron del 11,0% en 2000 al 11,6% en 2005. (La buena práctica internacional sería alrededor del 8% para una empresa de servicios públicos con las características de carga y geográficas de CFE.) Las pérdidas de LyFC en el segmento distribución son muy elevadas, habiendo excedido el 30% desde 2005. En su conjunto, las pérdidas técnicas y comerciales del sector eléctrico de México representan el 16,2% de la generación de electricidad (gráfico 2.2).

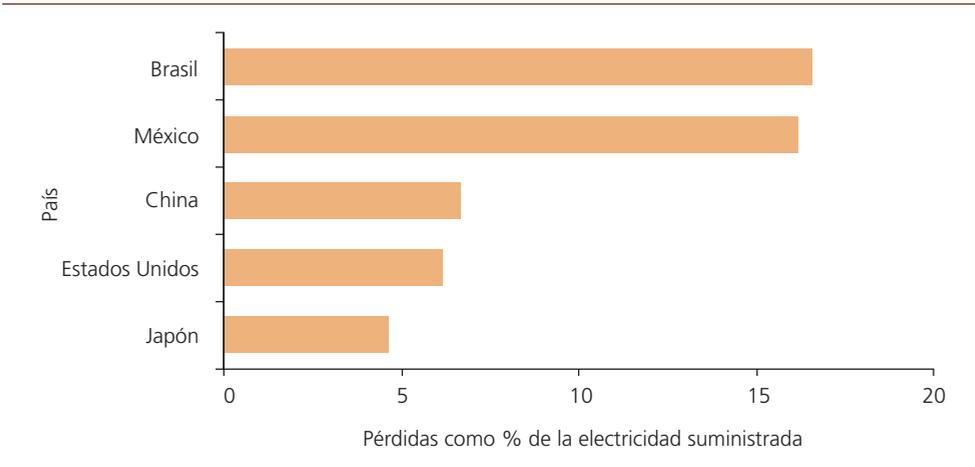
## El escenario de la línea base

El gobierno estima que la demanda de electricidad crecerá al 4,8% anual entre 2007 y 2016, comparado con la tasa de crecimiento del PIB anual del 3,0-3,5%.<sup>2</sup> Este ritmo de crecimiento sigue la tendencia histórica, según la cual el consumo de electricidad ha crecido considerablemente más rápido que el PIB. Alcanzar esta demanda creciente exigirá agregar 2.040 MW de capacidad nueva cada año en promedio. La inversión promedio anual –para los segmentos generación, transmisión, y distribución e instalaciones relacionadas con el manejo de combustibles, como puertos e instalaciones de procesamiento– se estima en aproximadamente \$5.500 millones.<sup>3</sup>

2 Esta cifra corresponde a las proyecciones realizadas en el 2007 y contenidas en la Prospectiva del Sector Eléctrico 2007-2016. Dada la crisis financiera global, la tasa de crecimiento de la economía podría estar por debajo de este promedio en los próximos años.

3 Aproximadamente el 40% de esta inversión se requerirá para la generación de electricidad. Para mayor información, ver SENER, 2007 y CFE, 2008b.

**Gráfico 2.2** Pérdidas en transmisión y distribución en el sector eléctrico en países seleccionados



Fuentes: Los datos de México provienen de la CFE; los datos de otros países provienen de documentos de la IEA sobre políticas energéticas para dichos países, así como de: IEA, 2006.

El escenario de la línea base utiliza las proyecciones de la demanda del gobierno para el período hasta 2016. Para el período 2017-30, supone que la generación de electricidad aumenta un 3,9% anual, alcanzando 630 TWh para el 2030. La capacidad instalada (excluyendo los proyectos de autoabastecimiento de electricidad) se estima que se incrementará por un factor de 2,2, de aproximadamente 50 GW en 2008 a 110 GW en 2030.<sup>4</sup>

La selección de las tecnologías para la generación de electricidad para el período 2017-30 se basó en los supuestos de que la ampliación se sustenta en las proyecciones de la demanda y en la tecnología de costo mínimo<sup>5</sup> y que se cumple con los requerimientos ambientales para las sustancias contaminantes (partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>). A

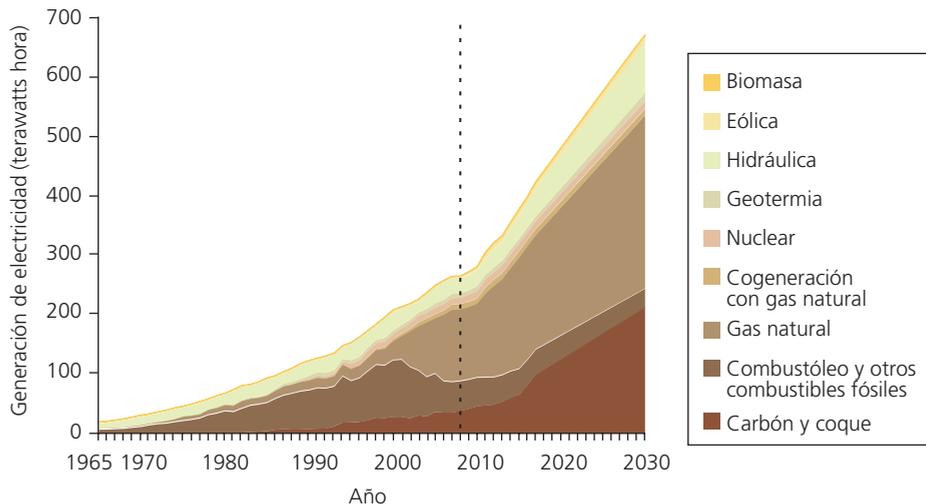
- 4 La Prospectiva del Sector Eléctrico 2008-2017 (SENER 2008c) del gobierno establece metas menores para la capacidad de generación de electricidad, a la luz de la crisis financiera internacional y la actual sobrecapacidad del sistema de generación de electricidad de México. Se podría revisar el escenario de la línea base para convergir hacia estos desarrollos recientes, si bien la magnitud global de las intervenciones en términos de toneladas de CO<sub>2</sub>e sería similar.
- 5 La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica establece para la Comisión Federal de Electricidad la obligación de adquirir “la producción de energía eléctrica que resulte de menor costo”. Este mandato, así como su interpretación más bien estricta, por parte de CFE, ha constituido una barrera para la penetración de tecnologías más limpias.

diferencia del actual concepto de planificación del gobierno, que establece un nivel máximo para la penetración del carbón, el escenario de la línea base supone que las tecnologías para suministro de electricidad están determinadas principalmente por los costos, sin tener en cuenta el cambio climático u otros criterios determinados por las políticas. El gran incremento en la generación de electricidad a partir de carbón en el escenario de la línea base es consistente con las tendencias recientemente observadas en varios países en todo el mundo.

Bajo estos supuestos, habría un cambio distintivo en la mezcla de combustibles en el sector eléctrico de México para el 2030, con un incremento casi sextuplicado en la generación de electricidad con centrales de carbón, que implicaría inversiones de consideración en infraestructura relacionada con el transporte y manejo de este combustible, y un incremento de 2,5 en la generación de electricidad a partir del gas (gráfico 2.3). Tanto las importaciones de carbón como las de gas para la generación de electricidad se incrementarían significativamente.

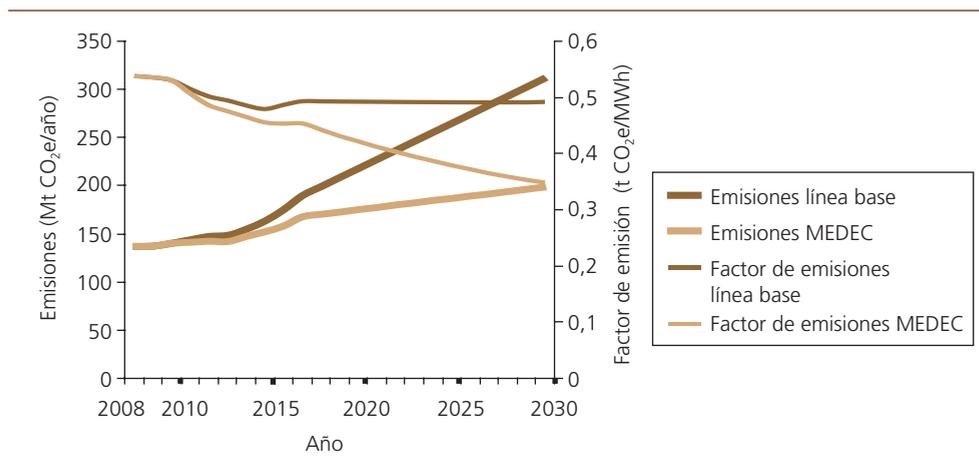
En el escenario de la línea base de mínimo costo, las emisiones totales de GEI producidas por la generación de electricidad se incrementan en un 230%, de 142 Mt CO<sub>2</sub>e en 2008 a 322 Mt CO<sub>2</sub>e en 2030 (gráfico 2.4). La ampliación de la generación de electricidad con centrales de carbón representa el 33,5% del incremento, mientras que la generación de electricidad con centrales de gas representa el 46,2%. A pesar de la

**Gráfico 2.3** Generación de electricidad por fuente de energía en México: tendencia histórica y proyectada según el escenario de la línea base, 1965-2030



Fuente: Autores, con base en los registros de SENER y CRE.

**Gráfico 2.4** Emisiones de GEI procedentes de la generación de electricidad: escenario de la línea base versus escenario MEDEC, 2008-30



Fuente: Autores.

participación mucho mayor de la generación de electricidad con centrales carboeléctricas, la intensidad global de las emisiones de carbono provenientes de la generación de electricidad cae en el escenario de la línea base, de 0,538 t CO<sub>2</sub>e/TWh en 2008 a 0,493 t CO<sub>2</sub>e/TWh en 2030, a causa de la mayor contribución de la generación hidráulica y a gas natural y la menor contribución del combustóleo.

### El escenario MEDEC de bajas emisiones

En el escenario MEDEC, la reducción de las emisiones de GEI se introduce como una meta explícita de la ampliación de la capacidad de generación de electricidad. No se realiza intento alguno para volver a optimizar el plan de ampliación del sector eléctrico del escenario de la línea base mediante la imposición de una limitación arbitraria a la mitigación de los GEI. En cambio, se evalúan varias opciones y tecnologías de suministro de electricidad. Como la línea base ya supone una disminución significativa en el uso del combustóleo, las tecnologías de bajas emisiones se comparan con las otras dos tecnologías dominantes en la generación de electricidad en la línea base que contribuyen a las emisiones de GEI: centrales termoelectricas de gas natural (tecnología de ciclo combinado) y centrales carboeléctricas (tecnología supercrítica).

El escenario MEDEC se forma reemplazando la nueva capacidad de generación de electricidad por estas tecnologías de la línea base con opciones y tecnologías de generación de bajas emisiones (cuadro 2.1). El potencial de cada una de las tecnologías de

**Cuadro 2.1** Costos nivelados de las principales tecnologías para la generación de electricidad \$/MWh

<i>Tecnología</i>	<i>Inversión en generación</i>	<i>Inversión en exploración</i>	<i>Costos O&amp;M</i>	<i>Costos combustibles no fósiles</i>	<i>Costos combustibles fósiles</i>	<i>Total</i>
<i>Tecnologías de línea base</i>						
Ciclo combinado con gas	19,57	n.a.	4,08	n.a.	55,17	78,98
Carbón supercrítico	30,97	n.a.	6,49	n.a.	18,33	55,79
Grandes hidroeléctricas	83,42	n.a.	1,55	3,58	n.a.	88,55
Turbina de gas	68,88	n.a.	9,62	n.a.	82,12	160,62
<i>Tecnologías del estudio MEDEC</i>						
Energía eólica	58,79	n.a.	10,45	n.a.	n.a.	69,24
Pequeñas hidroeléctricas	71,84	n.a.	13,50	3,58	n.a.	88,92
Geotermia	40,18	31,52	24,23	n.a.	n.a.	95,92
Biogás	52,60	n.a.	10,29	n.a.	n.a.	62,88
Cogeneración en Pemex	40,50	n.a.	-\$4,71	n.a.	-138,95	-103,16
Cogeneración en industrias	25,18	n.a.	4,89	n.a.	39,10	69,17
Cogeneración con bagazo	99,12	n.a.	n.a.	n.a.	-22,27	76,85
Generación con biomasa	40,37	n.a.	18,33	-7,48	0,34	51,55

Fuentes: Banco Mundial, 2008; CFE, 2008a.

Nota: Los costos de exploración para los combustibles fósiles no están incluidos puesto que están reflejados en los costos de los combustibles.

bajas emisiones se evaluó considerando la disponibilidad de los recursos renovables en México y la factibilidad técnica de integrar fuentes intermitentes en el sistema eléctrico. Sobre la base de la experiencia internacional en sistemas de electricidad con una participación relativamente grande de fuentes intermitentes de energía, no se espera que la confiabilidad del sistema eléctrico mexicano se vea reducida por la implementación del escenario MEDEC. Por otro lado, dado que el escenario MEDEC incluye una mezcla de tecnologías que suministran generación de base (geotérmica),

intermitente (eólica) y de punta (biomasa, así como la mayoría de las pequeñas hidroeléctricas y de la cogeneración), se puede suponer que es posible satisfacer la demanda del sistema eléctrico.

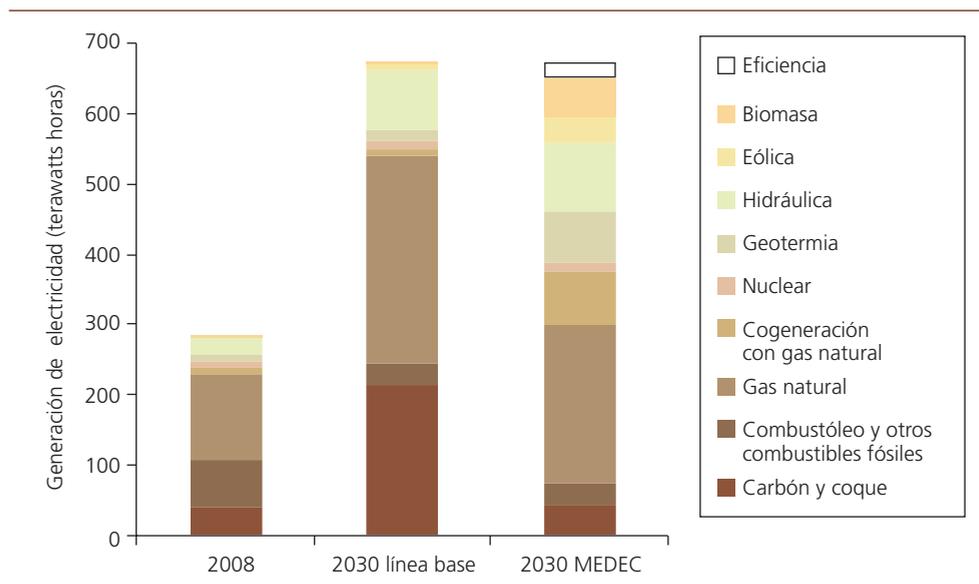
Los costos de inversión para las diferentes tecnologías de generación de electricidad están basados en referencias internacionales (Banco Mundial 2006b, 2008), suponiendo que no se producen cambios tecnológicos importantes durante el período del escenario.<sup>6</sup> Los costos de operación y mantenimiento y las cifras del consumo de combustible reflejan las condiciones locales imperantes en México (CFE, 2008a). Los precios de los combustibles se sustentan en proyecciones macroeconómicas comunes que se utilizan en todos los sectores y que reflejan las tendencias internacionales. El análisis de costos también estima los costos de los daños a la salud, de acuerdo con las evaluaciones de las externalidades publicadas de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, y partículas (PM10), pero éstos no están incluidos en la evaluación de los costos marginales de abatimiento ni en el cuadro 2.1.

El escenario MEDEC supone que se usarán las tecnologías para la generación de electricidad con un costo neto inferior a \$25/t CO<sub>2</sub>e. En este escenario, la participación de la generación con centrales carboeléctricas disminuye considerablemente respecto del escenario de la línea base, del 31 al 6%, y la contribución de las tecnologías de bajas emisiones se incrementa sustancialmente (gráfico 2.5). La participación en la generación de electricidad aumenta del 2,0 al 11,0% para la energía geotérmica, del 0,1 al 8,0% para la energía de la biomasa, del 1,3 al 6,0% para la energía eólica, y del 0,4 al 2,5% para la generación hidráulica de pequeña escala. Respecto de la línea base, la implementación del escenario MEDEC requiere una inversión estimada en \$9,000 millones para el sector eléctrico.

En este capítulo se incluyen cinco intervenciones (cuadro 2.2). Cuatro de ellas utilizan tecnologías de energías renovables para la generación de electricidad (eólica, hidráulica de pequeña escala, geotérmica y biogás). Otra intervención supone mejoras en la eficiencia energética de las empresas de servicios públicos, incluyendo aquéllas que se pueden lograr en los segmentos transmisión y distribución y en el equipamiento auxiliar de las centrales eléctricas existentes.<sup>7</sup> Otras cinco intervenciones que incluyen un componente significativo de generación de electricidad se presentan en otros capítulos.

- 6 Si bien, sin lugar a dudas, se producirá un cambio tecnológico en las tecnologías de generación de electricidad en el transcurso de las próximas dos décadas, el estudio adopta una postura neutral respecto de la tecnología y permite únicamente las reducciones de costos procedentes de las economías de escala.
- 7 El análisis de estas cinco intervenciones fue desarrollado por el equipo del sector eléctrico, con la colaboración del equipo de eficiencia energética. En el apéndice 3 se presenta una descripción detallada de los supuestos que se usaron para el análisis de estas intervenciones.

**Gráfico 2.5** Generación de electricidad por fuente de energía en el escenario de la línea base versus el escenario MEDEC



Fuente: Autores.

**Cuadro 2.2** Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector eléctrico

Intervención		Capacidad (MW)	Reducción anual máxima de emisiones (Mt CO <sub>2</sub> e/año)	Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO <sub>2</sub> e)
Eficiencia en empresas eléctricas		n.a.	6,2	19,3 (beneficio)
Generación de electricidad	Biogás	940	5,4	0,6 (costo)
	Energía eólica	10.800	23,0	2,6 (costo)
	Pequeñas hidroeléctricas	2.750	8,8	9,4 (costo)
	Geotermia	7.500	48,0	11,7 (costo)
Generación de electricidad en otros sectores	Cogeneración en PEMEX	3.690	26,7	28,6 (beneficio)
	Cogeneración en industrias	6.800	6,5	15,0 (beneficio)
	Cogeneración con bagazo	2.000	6,0	4,9 (costo)
	Cogeneración con biomasa	5.000	35,1	2,4 (beneficio)
	Co-combustión con leña	2.100	2,4	7,3 (costo)

Fuente: Autores.

Nota: las intervenciones relacionadas con la generación de electricidad en otros sectores se describen en los capítulos 3, 4 y 6.

n.a.: no aplica.

Varias intervenciones en el sector eléctrico se consideraron y evaluaron, pero no se incluyen aquí porque no cumplen con los criterios establecidos para MEDEC, por falta de información o por otras razones. La generación de electricidad a partir de concentración solar o de sistemas fotovoltaicos conectados con la red eléctrica serán muy probablemente opciones pertinentes en el transcurso de las próximas décadas, pero sus costos de mitigación se encuentran todavía por arriba del umbral de 25 \$/tCO<sub>2</sub>e. La generación de electricidad a partir de energía nuclear enfrenta una serie de problemas de seguridad, ambientales y económicos. Finalmente, la rehabilitación de centrales eléctricas, en particular aquellas con equipos obsoletos, es en muchos casos una opción costo-efectiva, pero no se analizó por falta de información adecuada.

### **Barreras para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la generación de electricidad**

La ejecución de intervenciones de mitigación en el sector eléctrico enfrenta importantes sesgos normativos e institucionales que perjudican a dos alternativas importantes de bajas emisiones: la cogeneración y las energías renovables. En el cuadro 2.3 se detallan las barreras adicionales para la implementación de estas alternativas.

El sector eléctrico está diseñado para operar con las actuales tecnologías convencionales de generación centralizada de electricidad. Si bien en numerosos casos la cogeneración y las energías renovables pueden competir con las tecnologías convencionales en México en términos de costos, esas tecnologías tienen características de escala y disponibilidad que no son propicias para un control centralizado. La reglamentación que rige las adquisiciones de las empresas públicas, por ejemplo, excluye en la práctica los proyectos de pequeña escala.

Los métodos actuales de planeación de la generación de electricidad no toman en cuenta los cobeneficios ofrecidos por las tecnologías de bajas emisiones. Además de la mitigación frente al cambio climático, estos beneficios pueden comprender la reducción de los impactos sobre el medio ambiente y la salud a nivel local, la seguridad del suministro de energía, la diversificación de fuentes de energía y la reducción de riesgos, y las mejoras a la competitividad industrial por el aumento de la eficiencia energética.

Existe un potencial considerable para reducir las emisiones de GEI mediante pequeñas centrales hidroeléctricas a costos adicionales moderados. El desarrollo de esta fuente de energía, no obstante, se ve dificultado por los costos de capital relativamente mayores y por el alto nivel de incertidumbre respecto de los permisos para derechos de concesión de agua, que son otorgados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y respecto a la disponibilidad de agua una vez que la planta se encuentra en funcionamiento, en los casos en los que el recurso se comparta con otros usos, tales como pesca y riego. El plan de distribución del recurso es determinado por la CONAGUA, que

**Cuadro 2.3** Desarrollo de bajas emisiones en el sector eléctrico mexicano: barreras y acciones correctivas

Barrera	Acción correctiva
<b>Proyectos de gran escala</b>	
La planeación busca tecnologías de costo mínimo y no considera el método de portafolio	Modificar los procedimientos de planeación para evaluar y considerar, además de los costos, los riesgos de volatilidad asociados con las diferentes tecnologías, y reducir al mínimo el riesgo y el costo total del portafolio en el largo plazo
La planificación no considera todos los costos y cobeneficios más allá de las propias centrales	Incluir otros beneficios como las externalidades ambientales locales, todos los costos de infraestructura (por ejemplo puertos y ductos) y los posibles ingresos por la mitigación de emisiones de GEI
Únicamente los proyectos de gran escala pueden participar en los procesos de licitación	Permitir que los proyectos de pequeña escala de energías renovables y cogeneración ofrezcan capacidad parcial en los procesos de licitación
Cuestiones ambientales y sociales no resueltas relacionadas con los grandes proyectos hidroeléctricos	Definir mejores mecanismos de negociación para planificar, construir y operar centrales hidroeléctricas <sup>a</sup>
<b>Proyectos de pequeña escala<sup>b</sup></b>	
No existen procedimientos de contratación predefinidos para que los proyectos de energías renovables y cogeneración puedan vender electricidad a la red	Desarrollar modelos de contrato para pequeños generadores
A los generadores a partir de energías renovables solamente se les paga el costo marginal de corto plazo, y no la capacidad	Desarrollar sistemas de pago que recompensen todos los beneficios, incluyendo la capacidad, la reducción de riesgos y las externalidades (incluyendo en su caso pagos por bonos de carbono)
No existen pagos por capacidad para los proyectos de cogeneración	
Es difícil obtener las licencias a nivel local y federal (permisos de construcción, de uso del suelo, etc.)	Definir procesos simplificados para otorgar licencias
Existen cuellos de botella en el segmento transmisión	Ampliar la capacidad de transmisión en áreas que tengan un gran potencial para energías renovables

Fuente: Autores.

Nota: El presente cuadro no considera el recientemente publicado Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética<sup>17</sup>

- Ver, por ejemplo, los mecanismos propuestos por la Comisión Mundial de Represas (CMR, 2000).
- Las barreras a los proyectos de pequeña escala se refieren principalmente a proyectos que suministran electricidad para el servicio público, más que a los proyectos de autoabastecimiento.

tradicionalmente le ha otorgado prioridad a las actividades que no están relacionadas con la energía. Esta práctica aumenta considerablemente el riesgo financiero de los proyectos hidroeléctricos y ha desalentado la participación del sector privado en los proyectos hidroeléctricos de pequeña escala utilizando el esquema de autoabastecimiento de energía eléctrica. Por otro lado, en muchas de las actuales instalaciones para el suministro de agua y el riego se podrían instalar equipos para la generación de electricidad. Las estimaciones preliminares sugieren que más de 70 represas para riego en México se podrían utilizar para la generación de electricidad (CONAE, 2002).

## Conclusiones

La demanda de electricidad en México ha estado creciendo más rápido que el PIB durante las últimas décadas, y es probable que esta tendencia continúe, puesto que el uso de la electricidad continúa creciendo en todos los sectores. Se estima que la satisfacción de la demanda creciente de energía en un escenario de línea base de mínimo costo producirá el aumento total de las emisiones de GEI provenientes de la generación de electricidad en un 230% entre 2008 y 2030, de 138 a 312 Mt CO<sub>2</sub>e. Con base en sus costos económicos de producción –excluyendo las externalidades del carbono y locales– tanto la generación con centrales carboeléctricas como la de las centrales eléctricas de gas se incrementaría en el escenario de la línea base, representando la generación de electricidad con carbón el 37% y con gas el 25% de la nueva capacidad.

La cogeneración podría proveer aproximadamente el 12,5% de la nueva capacidad en un escenario de bajas emisiones, a costos considerablemente inferiores a los costos marginales actuales de la generación de electricidad en México. La generación de electricidad utilizando la biomasa leñosa es una tecnología prometedora para México, cuyos costos estimados son también inferiores a los costos marginales actuales. A un costo de CO<sub>2</sub>e de tan sólo \$10/t, otras tecnologías de bajas emisiones –hidráulica, eólica, geotérmica, y otra biomasa, como el biogás y el bagazo– podrían reemplazar gran parte de la generación adicional de electricidad que emplea combustibles fósiles en el escenario de línea base. Los costos incrementales de inversión para el escenario MEDEC para el sector eléctrico ascienden a \$9.000 millones entre 2009 y 2030, gran parte de los cuales se compensarían con los menores costos operativos.

A pesar de los mecanismos regulatorios favorables para el desarrollo de proyectos de autoabastecimiento de electricidad con energías renovables, el entorno para explotar la cogeneración y las energías renovables sigue siendo inadecuado en México. Se requieren varios cambios de política y medidas regulatorias para vencer las barreras que han impedido el desarrollo exitoso del potencial en fuentes renovables de energía y en cogeneración. Esas barreras incluyen el hecho de que la CFE no tiene en cuenta las externalidades de la nueva generación de electricidad con combustibles fósiles en

la planeación, la falta de reconocimiento del efecto del portafolio energético,<sup>8</sup> y la incapacidad para adaptar los procedimientos de adquisiciones a las particularidades de los proyectos de energías renovables. Para la cogeneración –que tiene vínculos con el sector petróleo y gas y con otras industrias de uso final de energía– se requieren nuevos procedimientos de contratación para los generadores de electricidad de pequeña escala, a fin de reducir los riesgos y los costos de transacción.

En noviembre de 2008, México aprobó la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE, 2008) como parte del paquete de reforma energética y el Reglamento respectivo se publicó en septiembre de 2009. Su impacto dependerá de las metodologías y de los instrumentos regulatorios que expidan la Secretaría de Energía y la Comisión Reguladora de Energía en los próximos meses.

---

8 Con el fin de promover la diversidad de fuentes de energía en el sistema eléctrico, La Secretaría de Energía ha definido un límite máximo del 40% para la capacidad a base de gas natural y un mínimo de 25% para la capacidad a base de energías renovables, incluyendo grandes hidroeléctricas. Sin embargo, si se tiene en cuenta la volatilidad cada vez mayor de los precios del petróleo y del gas natural, así como la alta dependencia del país en estos hidrocarburos, un enfoque más efectivo podría ser el desarrollar una metodología de planeación que considere la volatilidad de los precios de los combustibles –por ejemplo a través de herramientas de la teoría del portafolio–, en vez de considerar un escenario con precios constantes.



# 3

## Petróleo y gas

El potencial para reducir las emisiones de GEI en el sector petróleo y gas en México mediante intervenciones tanto de bajo costo como del tipo “ganar-ganar” es significativo. Las intervenciones específicas que tienen tasas de retorno económicas buenas incluyen reducir las emisiones fugitivas en el sistema de distribución de gas, explotar el potencial para cogeneración en las instalaciones de Petróleos Mexicanos (Pemex) y mejorar la eficiencia energética en las instalaciones de refinación y procesamiento.<sup>1</sup> El éxito de los planes de Pemex para revertir la caída de la producción de petróleo e incrementar en mayor medida la producción de gas también desempeñará un papel importante en las futuras emisiones de GEI de México, dado que la alternativa es una mayor importación de combustibles fósiles, incluyendo carbón.

La industria de petróleo y gas en México es una importante fuente de ingresos, empleo, y también un orgullo nacional. Desde que fuera nacionalizada, a fines de la década de 1930, la industria petrolera ha contribuido enormemente al desarrollo del país.

Pemex actualmente se encuentra entre las empresas de mayor envergadura en el mundo en términos de sus activos. El petróleo es la fuente más grande de ingresos de exportación de México y ocupa en forma directa a más de 130.000 personas. Si bien la contribución de Pemex a la economía ha declinado en las dos últimas décadas –representaba el 6,5% del PIB en 2008– los ingresos derivados del petróleo aún representan más de un tercio del presupuesto federal.

Entre los grandes desafíos que enfrenta la industria petrolera de México está la necesidad de reducir el nivel de declinación de la producción petrolera. La producción de petróleo crudo aumentó de 3,0 millones de barriles por día (mbd) en 2000 a un nivel pico de 3,4 mbd en 2004. No obstante, para julio de 2009 la producción había caído

---

1 Para fines del presente estudio, el sector petróleo y gas incluye la extracción de petróleo y gas; la refinación, transporte y distribución de los derivados del petróleo; el transporte, procesamiento y distribución del gas natural, y una parte de la producción petroquímica secundaria en México en instalaciones de Pemex.

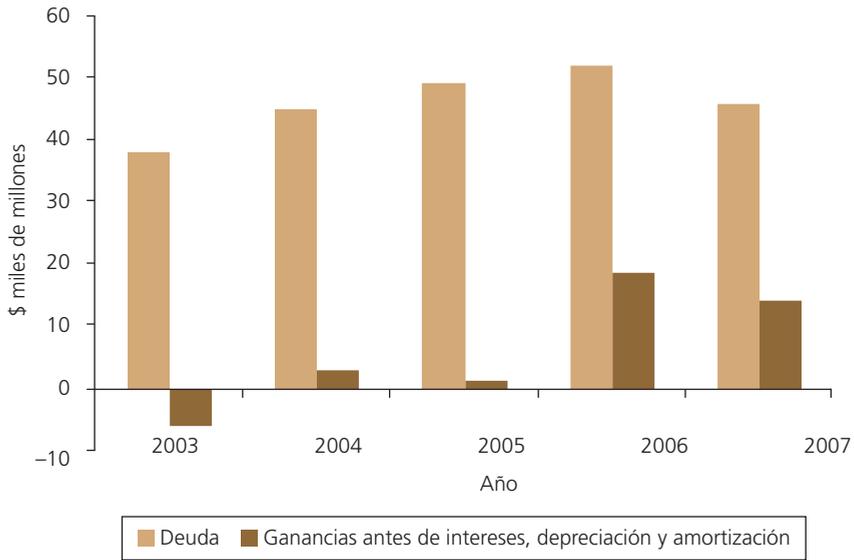
a 2,56 mbd, debido a la rápida declinación de la producción del mayor yacimiento de México, Cantarell. Apenas en 2004, la producción del yacimiento Cantarell representaba casi dos tercios de la producción total de petróleo de México (2 mbd); desde ese entonces, la producción ha caído abruptamente. En julio del 2009, la producción de Cantarell era de únicamente 0,6 mbd. Si la producción proveniente de yacimientos nuevos no llega a compensar las pérdidas de Cantarell, la producción petrolera mexicana podría caer por debajo de los 2,5 mbd para el 2010, con una gran reducción en las exportaciones de petróleo y la consecuente caída en los ingresos públicos. México también reconoce la necesidad de mejorar el nivel de eficiencia de Pemex.<sup>2</sup>

Las reformas recientemente implementadas en la industria de petróleo y gas se realizaron con el propósito de proveer a Pemex flexibilidad presupuestaria y financiera adicional. El gasto de Pemex, organismo federal descentralizado, está bajo las restricciones establecidas en el presupuesto federal, y sus obligaciones financieras están dentro de la estructura pública de endeudamiento.<sup>3</sup> En las últimas dos décadas, un presupuesto federal limitado y las restricciones al endeudamiento han conducido a un nivel de inversión insuficiente en el sector petróleo y gas para cumplir con las metas de producción y las mejoras asociadas con la calidad de la producción. Pemex en la actualidad es la compañía petrolera más endeudada del mundo (la deuda total ascendía a \$46.100 millones en 2007, y la relación entre endeudamiento y reservas probadas fue de \$3,1 dólares por barril equivalente de petróleo) (gráfico 3.1 y recuadro 3.1). Este elevado nivel de endeudamiento ha restringido la capacidad de la empresa para obtener financiamiento en los mercados privados de capital. México reconoce la relación entre la inversión en el sector petróleo y la producción y ganancias futuras. El problema radica en el hecho que las inversiones en el sector energía compiten con programas sociales urgentes, como salud, educación y alivio de la pobreza, que se han apoyado en los ingresos del petróleo para financiar los incrementos en las asignaciones presupuestarias.

Mantener la producción de gas natural es un objetivo fundamental para satisfacer la demanda de energía de México. La demanda de gas en México ha estado incrementándose durante las últimas dos décadas, a medida que en el país se extiende el uso de la generación eficiente y limpia de electricidad con centrales de ciclo combinado. Entre 2000 y 2007, la producción de gas natural aumentó un 29%, de 4.679 millones de pies cúbicos por día (mpcd) a 6.058 mpcd (gráfico 3.3). La mayor parte del incremento en la producción de gas natural se atribuye al gas no asociado (gas producido independiente-

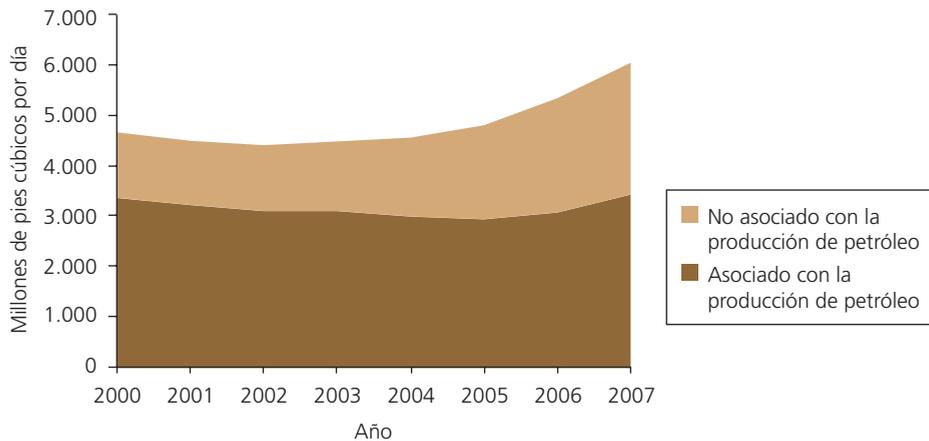
- 2 Numerosos países han optado por mejorar el clima de inversión y la rendición de cuentas de sus empresas estatales de energía durante las dos últimas décadas. Petrobras de Brasil y Statoil de Noruega, por ejemplo, han modernizado sus industrias petroleras, convirtiéndolas entre las más eficientes y rentables del mundo.
- 3 El paquete de reformas del sector energía recientemente aprobado también puso fin al uso de PIDREGAS (ver capítulo 2) para el financiamiento de largo plazo de Pemex.

**Gráfico 3.1** Deuda y ganancias de Pemex en los últimos años



Fuente: Pemex, 2008.

**Gráfico 3.2** Producción de gas natural en México



Fuente: SENER, 2008a.

mente del petróleo). Sin embargo, el incremento del 29% que tuvo lugar en la producción entre 2000 y 2007 fue insuficiente para satisfacer el aumento de la demanda, que trepó al 38% en el mismo período. Este hecho condujo a un considerable incremento en las importaciones de gas, procedentes principalmente de los Estados Unidos, tendencia que probablemente continúe en el corto a mediano plazo. Al mismo tiempo, se produce el venteo y quema de gas natural en volúmenes significativos en las instalaciones de producción de petróleo, principalmente en zonas *off-shore*. Si fuese explotada para el consumo (en vez de ser reinyectada en los yacimientos, que es otra opción), y se superase el reto de eliminar el alto contenido de nitrógeno, esta cantidad de gas natural podría casi compensar las importaciones de este combustible. Frente a la actual situación del gas natural en México, la Secretaría de Energía ha definido para sí las metas a corto plazo de aumentar la producción nacional y reducir el venteo y quema.

### El escenario de la línea base

En el escenario de la línea base, la producción de petróleo y gas alcanza su pico aproximadamente en 2016 y disminuye a partir de esa fecha (gráfico 3.4). Se estima que la demanda de energía –incluyendo el gas para electricidad y usos industriales, así como los derivados del petróleo (gasolina y diesel) para el sector transporte– aumentará durante este período. Determinar exactamente cuándo la producción de petróleo y gas alcanzará su pico tendrá un impacto significativo en la economía mexicana y en las emisiones de GEI. Si no aumenta significativamente la producción nacional de gas, México necesitará consumir otros combustibles para la generación de electricidad. El carbón importado es la fuente de combustible más factible si se toma en cuenta únicamente sus costos financieros y su disponibilidad. México también podría importar más gas natural de los Estados Unidos o a través de proyectos de gas natural licuado (GNL). En el escenario de la línea base, México podría dejar de ser un exportador neto de energía dentro de la próxima década.

### El escenario MEDEC de bajas emisiones

Se evaluaron tres intervenciones en el sector petróleo y gas,<sup>4</sup> incluyendo incrementar la cogeneración en Pemex, mejorar la eficiencia energética de las refinerías, y reducir las emisiones fugitivas de gas.<sup>5</sup>

4 El análisis de todas las intervenciones, con excepción de la cogeneración, fue desarrollado por el equipo del sector eficiencia energética y petróleo y gas. El equipo del sector eléctrico estuvo a cargo del análisis de la cogeneración.

5 La reducción del venteo y quema de gas es una estrategia de mitigación importante en el sector petróleo y gas. Desde 2007, México se encuentra entre los países del mundo que

*Cogeneración en Pemex.* El potencial de cogeneración en las refinerías y plantas de petroquímica básica de Pemex es equivalente a más del 6% de la capacidad total instalada de México. Aproximadamente 3.700 MW del potencial de cogeneración podría provenir de las seis refinerías y cuatro plantas petroquímicas de Pemex (cuadro 3.1) (Pemex, 2004).<sup>6</sup>

*Cuadro 3.1 Potencial de cogeneración en Pemex*

Tipo de instalación	Ubicación	Tamaño de la planta (MW)
Refinería	Cadereyta	375
	Madero	350
	Tula	480
	Salamanca	440
	Minatitlán	475
	Salina Cruz	565
Planta petroquímica	Cangrejera	400
	Morelos	300
	Pajaritos	105
	Independencia	200

Fuente: Pemex, 2004.

más ventean y queman gas, con un total de 5.600 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) y una tasa de emisiones que es elevada según los estándares internacionales. La mayor parte del gas asociado no recuperado de México (gas que se produce como un subproducto de la producción de petróleo) se quema *offshore* en el yacimiento Cantarell. Se estima que el venteo y quema de gas pueden haber producido hasta 44 Mt de CO<sub>2</sub>e en 2007, lo que representaría la mitad de las emisiones totales de GEI del sector petróleo y gas (extracción, refinación y producción de petróleo y gas), o aproximadamente el 6% de las emisiones de carbono totales nacionales. En la actualidad Pemex está emprendiendo inversiones para reducir considerablemente el venteo y quema de gas para el 2012; debido a esta estrategia, no se la incluye como una intervención en el escenario MEDEC.

- Recientemente Pemex lanzó el proceso de licitación para la construcción y operación de una central de cogeneración en la planta de procesamiento de gas Nuevo Pemex. Además de producir calor para alimentar a la central de gas, la instalación proveerá 300 MW de capacidad energética para cubrir los requerimientos de electricidad de esta y otras instalaciones de Pemex ubicadas en la zona Sureste de México (a través del porteo de la red eléctrica). Una inversión similar se está planeando en la refinería de Salamanca.

La operación de las refinerías y plantas de petroquímica básica requiere volúmenes considerables de vapor, que es producido por la combustión de combustibles fósiles, tales como gas, combustóleo o *fuel oil*, y productos destilados intermedios de refinación. Las refinerías de petróleo modernas utilizan plantas de cogeneración para proveer vapor para los procesos de refinación y electricidad tanto para el autoabastecimiento como para su venta a la red. La cogeneración se ha vuelto cada vez más atractiva, porque las refinerías utilizan el combustible residual pesado de bajo valor y contaminante proveniente del proceso de refinación, que limpian mediante la gasificación. El uso del combustible gasificado resultante en las turbinas de gas de la cogeneración puede alcanzar valores de eficiencia total (eficiencia térmica más eficiencia eléctrica) superiores al 80%.<sup>7</sup>

La primera fase de la inversión puede ser en una central eléctrica de cogeneración de ciclo combinado a partir del gas natural. Una segunda fase –que también sirve para eliminar el combustible residual sucio– es instalar un gasificador para aprovechar los combustibles residuales de las refinerías.

*Rehabilitación de refinerías.* La refinación de petróleo es una industria muy intensiva en el uso de energía. La utilización de combustibles varía según el tipo de petróleo crudo que se procese, la mezcla de productos derivados y las normas ambientales que deben cumplir dichos derivados. En las refinerías, la mayor parte de los procesos de conversión tienen lugar en condiciones de elevadas temperaturas y presión, contribuyendo de este modo a la formación de depósitos en las tuberías y equipos, que impiden la transferencia del calor, ocasionando así un mayor consumo de combustible. Se pueden utilizar varios métodos para reducir las pérdidas de energía resultantes, incluyendo el control de los procesos, el control de la temperatura y la limpieza y mantenimiento del equipo. En algunos procesos también es posible recuperar la energía de presión reemplazando los dispositivos de disipación de energía por turbinas hidráulicas, que a su vez operan otra maquinaria o generan electricidad (las bombas usadas como turbinas son especialmente apropiadas para este propósito). Revisar los procesos, instalar sistemas nuevos de recuperación de calor, implementar prácticas de mantenimiento y mejora, y realizar estudios y auditorías energéticas, todo ello puede contribuir a mejorar la eficiencia energética de una refinería y reducir las emisiones de GEI.

En general, las opciones disponibles para aumentar la eficiencia energética en una refinería se pueden agrupar en dos grandes categorías: a) acciones de bajo costo relacionadas con los sistemas de manejo de energía que se pueden implementar en el corto y mediano plazo, y b) programas de reconfiguración tecnológica de mayor envergadura y más exhaustivos, como las inversiones en tecnologías de uso de com-

---

7 Las eficiencias para todo el proceso en su conjunto (desde los combustibles residuales hasta el calor y la energía eléctrica) son algo menores.

bustibles y de procesos que exigen plazos más largos de implementación. Las medidas de manejo de energía comprenden los programas de mantenimiento, la instalación de equipos de recuperación de calor y presión y el alumbrado eficiente. Los programas de reconfiguración tecnológica implican la revisión y modificación de los procesos que se llevan a cabo en la refinería, así como la implementación de tecnologías más eficientes para la generación de energía, como la de integración energética.

Como resultado de las modestas medidas de eficiencia energética que adoptara Pemex entre 2001 y 2006, la intensidad energética se redujo en un 3%. Sin embargo, la eficiencia energética total de las refinerías mexicanas se encuentra muy por debajo de los estándares internacionales de la industria de refinación de petróleo.<sup>8</sup>

Para evaluar el potencial de eficiencia energética de las refinerías de Pemex, el equipo del estudio realizó la evaluación de una amplia renovación de procesos y equipos, incluyendo la recuperación de hidrógeno de los gases de salida en varias unidades de proceso (hidrocraqueo, hidrotratamiento, coqueo y craqueo catalítico de fluidos [FCC]). Considerando la complejidad y tamaño de las refinerías, por lo general es difícil lograr la eficiencia óptima mediante inversiones en proyectos de renovación. Un gran número de las inversiones en las refinerías mexicanas que mejoran la eficiencia energética y que son necesarias para cumplir con los estándares de calidad de combustibles cada vez más altos, a menudo no son rentables, puesto que es difícil trasladar a los consumidores los costos de las mejoras en calidad. Por esta razón, la intervención relacionada con la eficiencia energética en refinerías conlleva costos incrementales netos respecto de la línea base y tiene así un costo neto positivo de reducción de emisiones de GEI. Una vasta gama de inversiones menos exhaustivas y extremadamente costo-efectivas en las refinerías existentes –en particular para iluminación, bombas y motores– puede mejorar la eficiencia energética.

*Reducción de fugas en transporte de gas.* La reducción de las pérdidas de gas natural puede generar importantes ahorros financieros. Asimismo, dado que el gas natural (metano) tiene un potencial de calentamiento global 21 veces superior a las emisiones de CO<sub>2</sub>, los beneficios de reducir las emisiones fugitivas de metano en términos de los bonos de carbono se encuentran entre los más elevados, entre el abanico de intervenciones de mitigación de las emisiones de gases efecto invernadero. Las emisiones de metano originadas en los sistemas de gas natural representan un 18% estimado del total de emisiones de metano a nivel mundial, y México emite alrededor del 7% del total global proveniente de los sistemas de gas natural.

---

8 El Índice Solomon de Eficiencia Energética (IEE), un parámetro internacional de eficiencia energética en refinerías, mejoró para las refinerías mexicanas de 122 en 2001 a 118 en 2006. A modo de comparación, la eficiencia energética promedio para las refinerías canadienses es de 93 en este mismo índice.

Casi el 80% de las emisiones de metano procedentes del transporte de gas natural en México está relacionado con los sellos húmedos que se utilizan en la operación de los compresores dentro de la red de producción, almacenamiento y distribución por gasoductos. El reemplazo de sellos húmedos por sellos secos permite el uso de sistemas de alta presión, que pueden reducir las emisiones fugitivas, requerir un menor nivel de mantenimiento y reducir el riesgo de accidentes. El potencial para esta tecnología en México es considerable, teniendo en cuenta que 46 de los 67 compresores todavía utilizan sellos húmedos (cuadro 3.2). Se llevó a cabo un análisis económico sobre el reemplazo de los sellos húmedos por sellos secos utilizando el centro de procesamiento de gas de Ciudad Pemex como caso de referencia. Con base en los resultados alcanzados, se supuso que el programa se podría aplicar en todos los centros de gas que tuvieran sistemas de compresión con sellos húmedos.

**Cuadro 3.2** Potencial para el reemplazo de sellos de compresores en los complejos procesadores de gas de México

Complejo	Cantidad de compresores con sellos húmedos	Cantidad de compresores con sellos secos
Cactus	15	0
Nuevo Pemex	11	0
Ciudad Pemex	3	3
Coatzacoalcos	3	0
Poza Rica	4	0
Reynosa	2	0
Burgos	0	18
La Venta	5	0
Matapionche	3	0
Total	46	21

Fuente: Autores.

Se estimó que el reemplazo de los sellos húmedos tiene un potencial de reducción de 3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e hasta el 2030, o un promedio de 140.000 toneladas por año. Estimaciones recientes de las pérdidas de gas natural en México (de acuerdo con datos del programa *Methane to Markets*) indican que las pérdidas podrían ser significativamente más altas que las cifras oficiales que se citan más arriba, en cuyo caso las medidas para identificar e implementar las acciones tendientes a reducir las pérdidas serían de aún mayor importancia para la política de mitigación de gases efecto invernadero en México.

### Resumen de las intervenciones de petróleo y gas

El mayor beneficio neto proviene de incrementar la cogeneración en las instalaciones de Pemex, seguido del incremento de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones fugitivas de gas (cuadro 3.3). Se consideraron y evaluaron otras intervenciones en el sector petróleo y gas pero no fueron en última instancia incluidas en el escenario MEDEC, porque no cumplían con los criterios definidos por este estudio, porque los datos no estaban disponibles o por otras razones. El venteo y la quema de gas puede constituir una intervención costo-efectiva, pero Pemex está pensando en implementar la intervención en los próximos años, lo que significa que ha pasado a ser parte del escenario de la línea base. La reducción de las emisiones fugitivas de metano en la industria de petróleo y gas procedentes de otras fuentes que no sean las estaciones de compresión de gas, como las instalaciones para el almacenamiento de petróleo, puede ser costo-efectiva, pero había muy pocos datos disponibles para evaluar el potencial y los costos correspondientes. La falta de información también impidió realizar un análisis cuidadoso beneficio-costo de otras oportunidades potenciales.

**Cuadro 3.3** Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector petróleo y gas

Intervención	Reducción anual máxima de emisiones (Mt CO <sub>2</sub> e/año)	Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO <sub>2</sub> e)
Cogeneración en Pemex	26,7	28,6 (beneficio)
Reducción de fugas en transporte de gas	0,8	4,4 (beneficio)
Rehabilitación de refinerías	2,5	16,6 (costo)

Fuente: Autores.

### Barreras a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero

Las barreras a la implementación de las intervenciones para disminuir las emisiones de carbono en el sector petróleo y gas en México incluyen las barreras específicas a las intervenciones, así como aquéllas que son sintomáticas de la estructura organizativa y administrativa de Pemex (recuadro 3.1). Desde el punto de vista de Pemex, si bien las inversiones en centrales de cogeneración, por ejemplo, tienen excelentes tasas de retorno, dichas inversiones son menos atractivas que las actividades de exploración y desarrollo del petróleo y no son por lo tanto de alta prioridad.

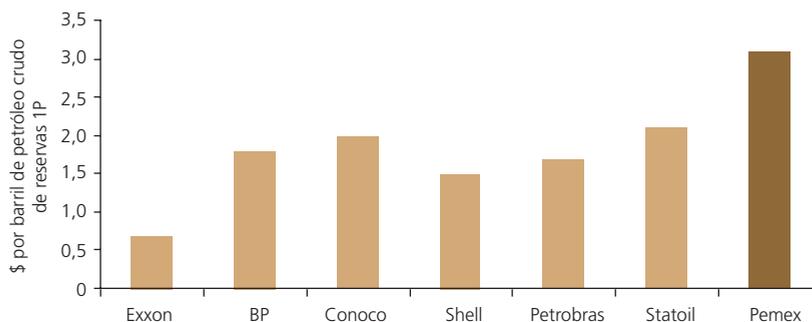
Por su elevado endeudamiento, a Pemex le ha sido difícil acceder a los mercados de crédito comercial con condiciones razonables. El objetivo de las reformas recientemente aplicadas en la industria petrolera apunta a mejorar esta situación. No obstante, dada la dependencia de México de los ingresos de la industria del petróleo para financiar

### Recuadro 3.1 El financiamiento de los proyectos de infraestructura de Pemex con altos beneficios ambientales

Un presupuesto federal más reducido y una capacidad de endeudamiento restringida han limitado la capacidad de Pemex para asignar recursos financieros a los proyectos de capital con un elevado beneficio ambiental y un alto retorno en los últimos años. La tasa de retorno financiera más alta esperada en las actividades de exploración y desarrollo ha descartado la posibilidad de financiar éstos y otros proyectos, a pesar de su beneficio ambiental y atractivo retorno. En promedio, la inversión en exploración y desarrollo ha sido superior al 80% del portafolio de Pemex.

Un factor adicional que dificulta el financiamiento de los proyectos que no son de exploración y desarrollo es el enorme endeudamiento de Pemex (*ver* gráfico 3.1 y gráfico inferior), que limita la capacidad de la empresa para obtener fondos en los mercados financieros comerciales. Pemex ha explotado el crédito comercial en el pasado para las inversiones de infraestructura, pero dada su baja calificación crediticia, la empresa a menudo ha utilizado otros mecanismos de financiamiento (principalmente el presupuesto aprobado federalmente y el programa PIDIREGAS). Si bien la relación de las utilidades antes de interés, depreciación y amortización con la deuda ha sido positiva en los últimos años, la crisis financiera internacional puede limitar la capacidad de la empresa para obtener financiamiento comercial para sus inversiones.

#### Relación entre deuda total y reservas probadas para empresas petroleras seleccionadas, 2007



Fuente: Estimaciones de los autores basadas en Pemex 2008.

el presupuesto federal, es probable que las medidas de dicha reforma que reducen los pagos de impuestos por parte de Pemex estén limitadas en el corto plazo.

La barrera más importante a la implementación de la cogeneración en México son las condiciones desfavorables para la venta de excedentes de electricidad a la red. La demanda de electricidad de Pemex actualmente está en el rango de 900 MW, una fracción del potencial para cogeneración superior a 3.700 MW. Si bien parte de la pro-

ducción ineficiente de electricidad en Pemex se puede reemplazar por la cogeneración más eficiente, Pemex debe poder vender sus excedentes de electricidad (así como la capacidad correspondiente) a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para utilizar todo el potencial de la cogeneración en sus instalaciones. Dado que se estima que el costo de la cogeneración operada en las instalaciones de Pemex es significativamente inferior a la nueva capacidad de generación de electricidad que CFE está planeando contratar, los beneficios para México son evidentes.

En teoría, la inversión en instalaciones de cogeneración por parte de Pemex se podría contratar con el sector privado, porque no involucra la “propiedad” de los recursos de petróleo o gas. Este no es el caso para la reducción de las emisiones fugitivas de gas o para las mejoras en la eficiencia energética. Los acuerdos contractuales con los inversionistas privados enfrentarían obstáculos legales más onerosos en estas áreas.

Varias son las razones por las cuales Pemex no ha aplicado más medidas de eficiencia energética en sus refinerías. Algunas de ellas se relacionan con las restricciones a las inversiones impuestas a Pemex por el gobierno federal y la falta de éxito en reconfigurar las refinerías para cumplir con estándares de calidad de combustibles más estrictos y eliminar los combustibles residuales altamente contaminantes.

## Conclusiones

Existe un importante potencial para reducir las emisiones de GEI en el sector petróleo y gas en México a través de intervenciones “ganar-ganar” e intervenciones de bajo costo. En particular, existe un importante potencial para la cogeneración en las instalaciones de Pemex, en donde se podría instalar más del 6% de la capacidad total de generación de electricidad del país. Otra intervención específica que puede reducir las emisiones de GEI y que tiene una buena tasa de retorno económica es la reducción de las emisiones fugitivas de gas en la red de distribución.

Numerosas restricciones normativas han limitado las inversiones en eficiencia energética en Pemex. Se espera que las medidas incluidas en la reforma de la industria petrolera que se aprobaron en 2008 allanen el camino para que Pemex emprenda las inversiones requeridas, incluyendo mejoras en el nivel de eficiencia. Una limitación importante sigue siendo la enorme participación de los ingresos petroleros en el presupuesto federal. Las medidas que permitirían la contratación con el sector privado para financiar las inversiones de cogeneración dentro del marco legal vigente podrían reducir algunas de las limitaciones que actualmente Pemex enfrenta para la realización de inversiones.

Vencer las barreras a la producción nacional de gas constituirá un factor determinante del futuro de las emisiones de CO<sub>2</sub> en México, porque en todos los escenarios la producción de gas natural necesitará incrementarse considerablemente para satisfacer la demanda creciente del sector eléctrico, industrial, y residencial y comercial. Sin

grandes fuentes nuevas de gas natural, la alternativa de costo mínimo para la generación de electricidad será el carbón.

Uno de los objetivos del paquete de reformas del sector energético aprobada por el Congreso mexicano en 2008 fue proveer un mayor grado de flexibilidad para permitir a Pemex que opere de manera similar a otras compañías petroleras nacionales. A pesar de la mayor flexibilidad en el área financiera, de presupuesto y de adquisiciones que se incluye en las reformas mencionadas, todavía no está claro si el sector privado se verá atraído por las nuevas condiciones de Pemex, especialmente en actividades de exploración y desarrollo. Si bien la reforma no permite la inversión privada en las actividades *downstream*, la expectativa es que Pemex pueda contratar servicios que preste el sector privado. Considerando que algunos proyectos de inversión de bajas emisiones, como la cogeneración, podrían ser provistos bajo contratos de servicios celebrados con Pemex, estos proyectos podrían servir para poner a prueba el efecto de las reformas recientemente adoptadas tendientes a mejorar la inversión en actividades en áreas distintas a la exploración y desarrollo.

# 4

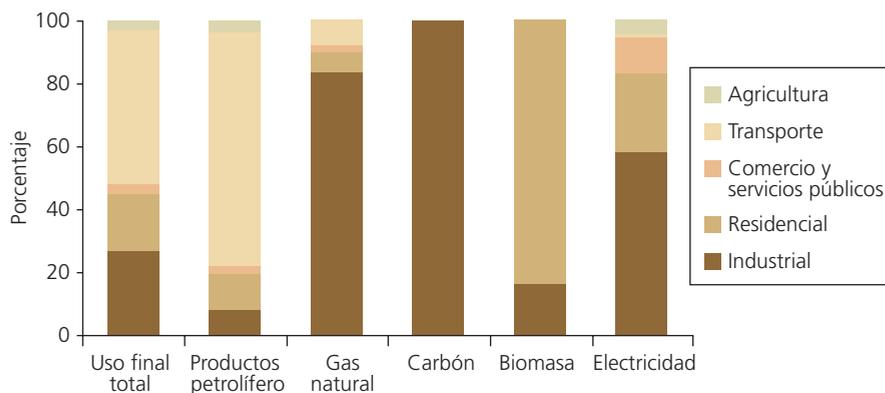
## Uso final de energía

El manejo del crecimiento de la demanda de electricidad y combustibles aplicando medidas de eficiencia energética en los sectores de uso final de energía constituirá un elemento fundamental para mitigar las emisiones de GEI. Los sectores industrial, residencial, y comercial y de servicios públicos representan el 95% del consumo de electricidad en México, y el uso de la electricidad por parte de estos sectores ha estado creciendo a algo más del 4% anual desde 1995. Por el contrario, el consumo de combustibles (consumo directo de gas, petrolíferos y carbón) de estos tres sectores, que representa aproximadamente el 42% del uso final de combustibles en México, ha permanecido básicamente uniforme desde 1995. Estas tendencias reflejan cambios en los patrones de producción industrial (con una disminución en la producción de materiales básicos con un uso intensivo de combustibles), así como el impacto de la mayor riqueza en las zonas urbanas, que tiende a hacer subir el consumo de electricidad.

El presente capítulo examina la contribución del uso final estacionario (es decir, para aplicaciones distintas al transporte) de energía a las emisiones de GEI en México y los potenciales y costos de las reducciones de las emisiones de carbono mediante mejoras de eficiencia energética. El análisis se centra en los tres grandes sectores de uso final de energía (tal como lo definen las estadísticas nacionales de energía): industrial, residencial, y comercial y de servicios públicos. En conjunto estos sectores representan aproximadamente el 48% del uso final total de energía en México (gráfico 4.1). (El transporte, que depende casi exclusivamente de los derivados del petróleo y que representa el 49% del uso final de energía, se analiza en el capítulo 5.)

Los programas nacionales de eficiencia energética de México comenzaron a implementarse a principios de la década de 1990, después de la creación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) en 1989 y del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) en 1990. Después de la publicación de la Ley para el Aprovechamiento Sostenible de la Energía (LASE, 2008) en noviembre de 2008, la CONAE se convirtió en la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), organismo desconcentrado de la Secretaría de Energía, con

Gráfico 4.1 Usos finales de energía en México por sector, 2006

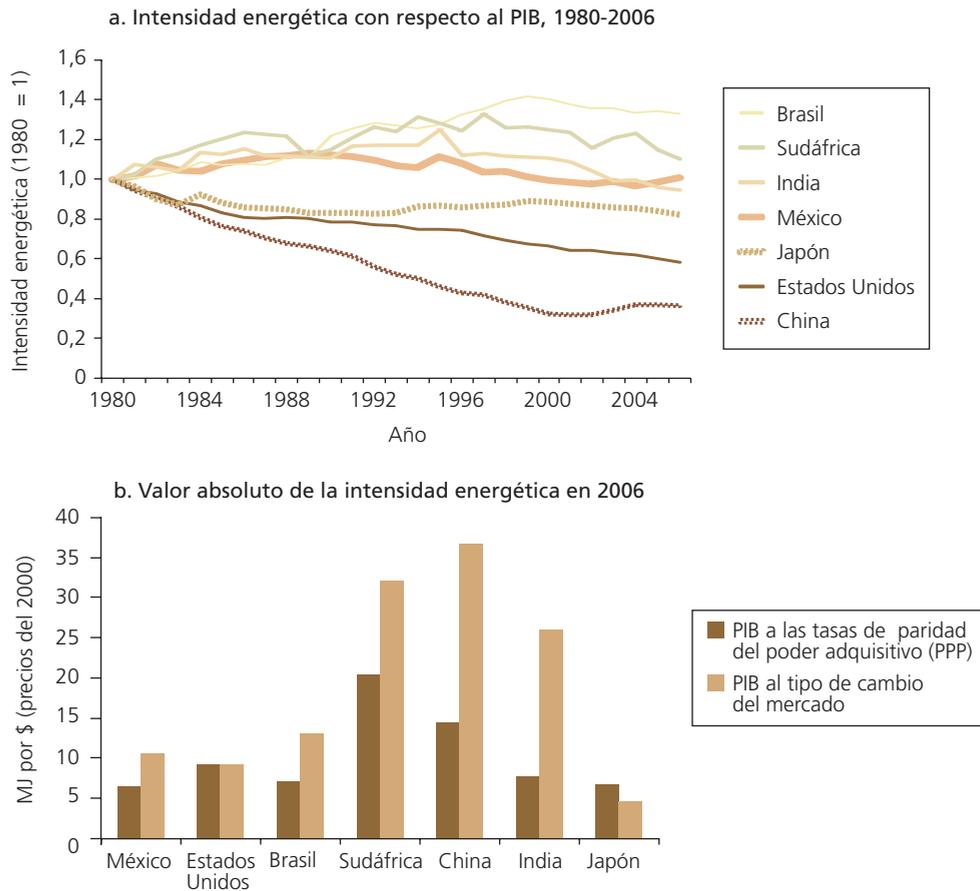


Fuente: IEA 2008a.

autonomía técnica y operativa. El objetivo de la CONUEE es promover la eficiencia energética y desempeñar el papel de autoridad técnica en materia de uso sostenible de la energía. La CONUEE ha desarrollado y promovido la aplicación de normas oficiales mexicanas de eficiencia energética para aparatos electrodomésticos y equipos industriales, así como otras medidas de eficiencia energética. El FIDE, un fideicomiso privado-público creado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ha sido líder en promover ahorros de electricidad a través de medidas de manejo de la demanda, como la introducción de lámparas fluorescentes y el retiro de aparatos electrodomésticos obsoletos. Se estima que a partir de 2006, las normas relacionadas con los usos finales de la electricidad produjeron un ahorro total acumulado de 16.065 GWh y evitaron aproximadamente 2.926 MW de capacidad de generación. Los programas de eficiencia energética del FIDE lograron ahorros de electricidad estimados en 15.146 GWh y evitaron 1.745 MW de capacidad de generación a partir de 2008 (FIDE, 2008).

Queda un considerable potencial para realizar mejoras de eficiencia energética en México. Después de las mejoras significativas logradas en la década de 1990, la tendencia descendente de la intensidad energética del PIB en México se ha estancado (gráfico 4.2), principalmente por el rápido incremento del consumo de electricidad, que ha crecido significativamente más rápido que el PIB. Tanto la CONUEE como el FIDE han establecido metas ambiciosas para los ahorros de electricidad para 2012. El análisis de línea base establece el contexto para comprender el potencial de los ahorros de energía en cada uno de los tres principales sectores de uso final.

**Gráfico 4.2** Comparación internacional de tendencias de intensidad energética



Fuente: Con base en datos de la Energy Information Administration ([www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov)).

### El escenario de la línea base

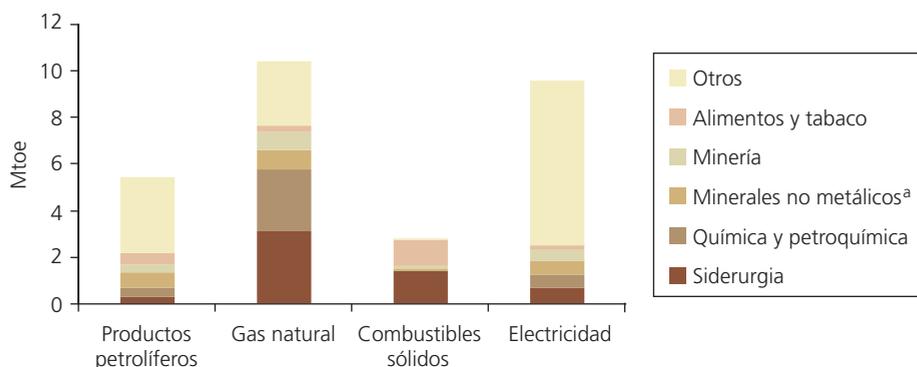
Los sectores industrial, residencial, y comercial y de servicios públicos representan la mayor parte del uso de la electricidad y una participación considerable en el uso de combustibles en México. El sector industrial está caracterizado tanto por industrias extremadamente modernas y eficientes en el uso de energía tales como las del acero y el cemento, como por industrias anticuadas que tienen un consumo de energía muy elevado, muchas de ellas pequeñas y medianas empresas. En los sectores residencial y comercial y de servicios públicos, la demanda de aire acondicionado y refrigeración

ha estado creciendo y es probable que continúe haciéndolo a medida que suban los ingresos de la población y porque el uso de electricidad per cápita aún es una fracción de aquél que se presenta en países de ingresos altos con un clima similar.

### El sector industrial

El sector industrial es el segundo consumidor final de energía más grande en México (después del sector transporte) y representa aproximadamente el 27% del uso final total de energía.<sup>1</sup> Es el usuario de electricidad de mayor envergadura, representando el 58% del consumo total de electricidad.<sup>2</sup> Más de la mitad del uso de energía en el sector industrial se concentra en cinco subsectores principales, que también representan la mayor parte del uso de combustibles (petrolíferos, gas y combustibles sólidos): cemento (minerales no metálicos), siderurgia, química y petroquímica, minería, y alimentos y tabaco (gráfico 4.3).

Gráfico 4.3 Uso de energía en la actividad industrial por subsector, 2006



Fuente: IEA, 2008a.

a. Los minerales no metálicos incluyen cemento, vidrio, cerámica, ladrillos y otros.

- 1 Esta cifra no incluye los sectores de transformación de energía, como la generación de electricidad y petróleo y gas.
- 2 Aproximadamente 22.000 GWh anuales incluidos en el consumo industrial de electricidad son realmente atribuibles al sector comercial y de servicios públicos, porque numerosos edificios grandes de uso no industrial pagan una tarifa de electricidad para uso industrial, y esta es la base sobre la que se recaba la información. Por lo tanto, el uso industrial de la electricidad está sobreestimado, mientras que el uso de electricidad en los sectores comercial y de servicios está subestimado en las actuales estadísticas sobre electricidad en México (estimación de Odón de Buen, consultor en eficiencia energética, 2009).

Algunas industrias de materiales básicos de gran escala en México son relativamente eficientes en comparación con los estándares internacionales. La industria siderúrgica de México, por ejemplo, se encuentra entre las de mínima intensidad de carbono en el mundo, en parte gracias a su utilización de tecnologías avanzadas (IEA, 2007).<sup>3</sup> La intensidad energética del acero crudo en México ha permanecido por debajo de los 14 gigajoules por tonelada (GJ/t) desde comienzos de la década de 2000, comparado con el promedio global de aproximadamente 20 GJ/t. En la industria del cemento en México, el uso total primario de energía por tonelada es un 19% inferior al de Canadá y un 27% menor al de Estados Unidos, aunque es aproximadamente un 15% más alto que el de los líderes mundiales Brasil y Japón (IEA, 2007). No obstante, una gran parte del sector industrial de México está compuesto por pequeñas y medianas empresas en una amplia gama de actividades que tienen una intensidad energética relativamente alta. A menudo estas empresas utilizan equipos más antiguos y no tienen acceso al conocimiento técnico ni al financiamiento para realizar mejoras.

En términos generales, además de la cogeneración, las principales fuentes de ahorros de energía en el sector industrial provienen de las mejoras en eficiencia energética en los sistemas de motores, sistemas de vapor y hornos. Los motores representan el 70% del consumo total de electricidad industrial en México y los sistemas de vapor representan un 40% del consumo de combustibles en el sector industrial. Los hornos representan la mayor parte del consumo restante de combustibles y electricidad en el sector industrial. De acuerdo con la evaluación de eficiencia energética en el sector industrial de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2007), la adopción de las mejores prácticas internacionales produciría ahorros técnicos de energía del 20% en los motores industriales, del 10% en los sistemas de vapor y del 15% en hornos. Aproximadamente el 80% del potencial de cogeneración industrial de México no se ha utilizado aún, y este potencial no desarrollado se concentra en las instalaciones de PEMEX (*ver* capítulo 3) y en las industrias de alimentos, química y farmacéutica, automotriz, celulosa y papel, textil, vidrio y azúcar.

### *El sector residencial*

El sector residencial representa aproximadamente el 18% del uso final total de energía en México. Su participación en el consumo total de electricidad aumentó del 16% en 1995 al 22% en 2006. El consumo de electricidad residencial per cápita en México es aproximadamente de 320 kWh/año –aproximadamente un décimo de los 3.150 kWh/año que se consumen en los Estados Unidos. En los estados de Arizona, Nuevo México

---

3 El proceso de reducción directa utiliza un gas de reducción (en el caso de México, gas natural) para reducir el mineral de hierro para producir hierro reducido en directo, que luego puede ser utilizado para alimentar los hornos de arco eléctricos. Estos hornos representan aproximadamente tres cuartos de la producción de acero de México, una de las participaciones más altas del mundo (IEA, 2007).

y Texas, que tienen una elevada demanda de aire acondicionado y un clima similar al de grandes extensiones de México, la electricidad representa hasta el 80% del consumo residencial de energía. A medida que crecen los ingresos de la población en México, el consecuente potencial de crecimiento de la demanda residencial de electricidad es sorprendente. En las zonas urbanas de México, para cocinar y calentar agua se utiliza principalmente el gas licuado de petróleo (gas LP), que representa más del 53% del consumo residencial de combustible.

*Consumo de biomasa.* El consumo de biomasa, que representa aproximadamente el 40% del uso residencial de combustibles, ha permanecido estable en México; se utiliza principalmente en viviendas rurales para cocinar en los tradicionales fogones abiertos. El uso residencial de la biomasa es relevante en términos de las emisiones de GEI por dos importantes razones. En primer lugar, el consumo de biomasa produce emisiones netas de CO<sub>2</sub>, porque una parte de la leña utilizada no se corta de manera sostenible. En segundo lugar, se emiten GEI distintos al CO<sub>2</sub> por la combustión incompleta de la biomasa. Por otra parte, el uso tradicional de la biomasa está vinculado con severos problemas respiratorios y de otra índole que afectan a la salud, especialmente entre las mujeres y niños en las viviendas rurales, por la exposición al humo producido por la combustión incompleta de la leña. La experiencia en México demuestra que la transición hacia la utilización del gas LP en las viviendas rurales enfrenta importantes barreras económicas y culturales; por ello en el corto plazo la difusión de estufas o cocinas mejoradas de leña es la manera más factible para resolver tanto el impacto sobre la salud como las emisiones de GEI (Troncoso *et al.*, 2007).

*Aire acondicionado, refrigeración y aparatos electrodomésticos o electrónicos.* Se estima que el aire acondicionado, la refrigeración y los aparatos electrodomésticos y dispositivos electrónicos serán las áreas principales donde crecerá la demanda residencial de electricidad en México. En la actualidad, estos tres usos finales de energía más la iluminación representan aproximadamente cuatro partes iguales en el consumo residencial de electricidad. Las tasas de saturación del aire acondicionado en México sólo alcanzaron alrededor del 20% en 2005, en comparación con aproximadamente el 95% en distintas regiones de Estados Unidos con similares grados-días de refrigeración. Un estudio reciente pronostica que el uso de la electricidad por el aire acondicionado en México podría aumentar diez veces para el 2030, triplicando el uso total residencial de la electricidad de 2005 (McNeil y Letschert, 2008). La tasa de saturación de refrigeradores es relativamente elevada en México, 82% (2006), pero todavía puede crecer, tanto en número como en capacidad de almacenaje. A pesar de los esfuerzos recientemente realizados para promover el uso de lámparas fluorescentes compactas, las lámparas incandescentes aún representan aproximadamente el 85% de los focos en uso residencial en México, lo cual indica el gran potencial que existe para intensificar la introducción de lámparas eficientes.

México tiene normas mínimas de desempeño energético para 18 tipos de equipos que consumen electricidad, incluyendo los acondicionadores de aire, refrigeradores y lavarropas. En general, estas normas están a la par y son compatibles con las normas de Estados Unidos, gracias a los esfuerzos de coordinación que comenzaron a principios de la década de 1990. Se pueden alcanzar grandes ahorros de electricidad mediante el retiro acelerado de acondicionadores de aire y refrigeradores obsoletos e ineficientes y el cumplimiento de las normas obligatorias cada vez más estrictas que deben cumplir los productos nuevos. La disponibilidad de acondicionadores de aire de segunda mano baratos e ineficientes procedentes de Estados Unidos es un problema particular para la región Norte de México, donde la demanda de aire acondicionado es también la más alta.

México no tiene un código de eficiencia energética residencial para edificios (entendidos éstos como cualquier edificación de uno o más niveles, incluyendo las viviendas unifamiliares). Dicho código ha demostrado ser un medio altamente efectivo para reducir las cargas de enfriamiento (mediante aislamiento térmico y mejoras en las ventanas) en el estado de California en Estados Unidos, donde en forma progresiva se han aplicado códigos obligatorios de eficiencia energética para edificios desde fines de la década de 1970. La combinación de códigos para edificios residenciales con demandas de enfriamiento inherentemente menores y acondicionadores de aire de alta eficiencia puede reducir drásticamente el consumo de electricidad para aire acondicionado en las casas nuevas.

El agua caliente en los hogares representa aproximadamente el 52% del consumo residencial de gas LP y gas natural (PROCALSOL, 2007). Si bien hay potencial para mejorar la eficiencia energética de los calentadores o calderas de agua, se pueden realizar ahorros de combustibles fósiles muy superiores ampliando el uso de calentadores solares de agua, especialmente en las viviendas de baja densidad, tales como viviendas unifamiliares.

### *El sector comercial y de servicios públicos*

Se estima que el uso final de energía por parte del sector comercial y de servicios públicos en México es inferior al 4% del uso final total de energía. No obstante, es un sector consumidor importante de electricidad, pues representa el 21% del uso total de este tipo de energía (IEA 2008a; SENER 2008b).<sup>4</sup> A medida que las ciudades crecen y se modernizan, el sector comercial y de servicios públicos asumirá un rol mucho más importante en el uso de energía en México. En Estados Unidos, el sector comercial y de servicios públicos representa aproximadamente el 14% del uso final total de energía y el 35% del consumo total de electricidad.

---

4 Los datos sobre uso total de energía se basan en los de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2008a). Según el Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía (SENER, 2008d), en 2008 el consumo de electricidad de los sectores comercial y de servicios públicos ascendió a 24.300 GWh por año (11% del total de México). No obstante, la cifra

La iluminación representa más de la mitad del consumo de electricidad en el sector comercial y de servicios públicos en México, el aire acondicionado y la refrigeración representan aproximadamente el 18% cada uno, y la energía utilizada por las empresas de suministro de agua y saneamiento representa aproximadamente el 9%. Puesto que una gran parte del sector comercial y de servicios públicos (edificios públicos y empresas municipales de suministro de agua) es propiedad de los gobiernos federal, estatales o municipales, existe la posibilidad de alcanzar importantes economías de escala a través de programas bastante simples de adquisición de nuevos equipos o de modernización de los existentes.

Los nuevos edificios comerciales deben cumplir dos normas nacionales aplicadas a través de verificaciones por terceros. El cumplimiento de la norma del sistema de iluminación se garantiza mediante el proceso de contratación del servicio de electricidad por parte de las empresas públicas (Comisión Federal de Electricidad [CFE] y Luz y Fuerza del Centro [LyFC]), que exigen certificados de cumplimiento. En cambio, son las autoridades locales las que deben dar seguimiento al cumplimiento de la norma de envolvente térmica de edificios, lo cual sólo ocurre cuando dicha norma se incluye en los reglamentos de construcción locales vigentes. La falta de capacidad y voluntad política a nivel local ha contribuido al incumplimiento de esta norma. Si se toma en cuenta el importante potencial de incremento en el uso de electricidad en el sector comercial y de servicios públicos, será fundamental que las normas de eficiencia energética para iluminación, refrigeración, aire acondicionado y edificios se vuelvan más estrictas y que se desarrollen mecanismos para asegurar su cumplimiento, a fin de reducir las emisiones de GEI producidas por este sector.

### *Proyecciones de la demanda del uso final de energía*

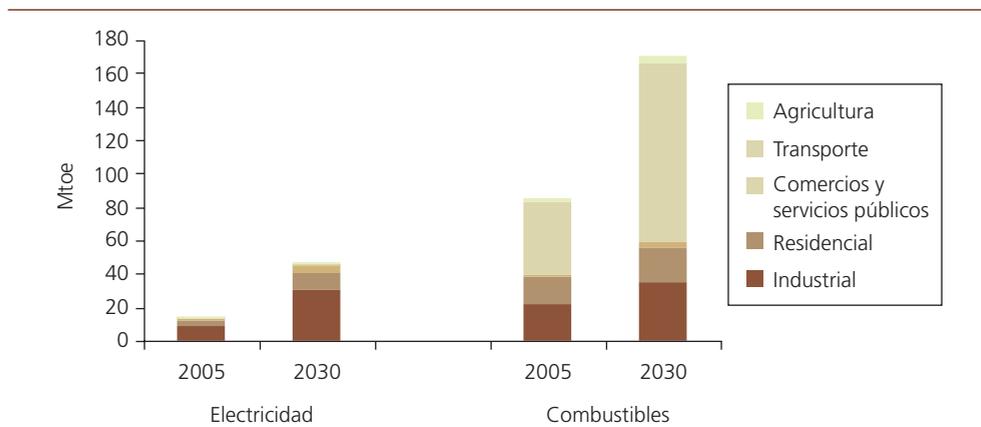
En el escenario de la línea base, la proyección de la demanda total de electricidad alcanza 425 TWh en 2030, partiendo de 222 TWh en 2008 (esto excluye las pérdidas en transmisión y distribución, las pérdidas no técnicas y el consumo propio de las centrales eléctricas). Se prevé asimismo que la contribución de los sectores residencial, comercial y de servicios públicos en su conjunto suba al 67%, en comparación con 47% en 2008.

El componente más importante del consumo final de combustibles es el transporte, que se analiza en el capítulo 5. Para los sectores industrial, residencial, comercial y de servicios públicos, se estima que la demanda de combustible crecerá a una tasa anual promedio inferior al 2% (gráfico 4.4).

---

real del consumo de electricidad del sector comercial y de servicios públicos está próxima a 46.300 GWh por año, o sea 21% del total (ver la nota 2, más arriba).

**Gráfico 4.4** Uso final de energía por sector. Escenario de la línea base



Fuente: Autores.

### El escenario MEDEC de bajas emisiones

El estudio MEDEC evaluó los costos y el impacto de 11 intervenciones relacionadas con el uso final de energía. A continuación se describe brevemente cada una de estas intervenciones.<sup>5</sup>

#### Eficiencia en el uso final de electricidad

- *Aire acondicionado residencial.* Esta intervención se dirige al millón de viviendas en México que utilizan actualmente aire acondicionado de manera más intensiva. Implica acelerar el retiro paulatino de los acondicionadores de aire obsoletos para el 2030 e instalar aislamiento térmico en estas viviendas. Se supone que el efecto conjunto de los nuevos acondicionadores de aire que cumplen con la norma y la instalación del aislamiento térmico redundará en la reducción del

5 Los beneficios aguas arriba (“upstream”) de los ahorros en electricidad en términos de la capacidad de generación de electricidad, el uso de combustibles, los costos de operación y mantenimiento y las emisiones de carbono evitadas, se calcularon según los mismos supuestos considerados para el sector energético, es decir, que se desplaza una mezcla de generación de electricidad con carbón y gas natural. Varios equipos condujeron estos análisis: el equipo de uso del suelo y bioenergía desarrolló las estufas mejoradas y la cogeneración con bagazo; Odón de Buen (consultor en eficiencia energética) analizó el alumbrado público, la iluminación no residencial y el aire acondicionado no residencial; el equipo de electricidad participó en las dos intervenciones de cogeneración; el equipo de eficiencia energética estuvo a cargo del resto de las intervenciones.

consumo de electricidad para acondicionamiento de aire por parte de estas viviendas de 4.000 a 700 kWh/año.

- *Iluminación residencial.* En 2008 había 234 millones de focos en uso en aproximadamente 29 millones de viviendas en México. El escenario MEDEC supone que el 85% de todos los focos utilizados una hora por día o más en el 80% de las viviendas serán lámparas fluorescentes compactas.
- *Refrigeración residencial.* Esta intervención propone la sustitución acelerada de los refrigeradores que tienen una antigüedad de 10 años o más por nuevos equipos que cumplan con las normas vigentes.
- *Aire acondicionado no residencial.* El consumo de electricidad en acondicionamiento de aire para edificios del sector comercial y de servicios públicos se calculó para varios tipos de edificios. Esta intervención evalúa el efecto de acelerar la sustitución de los equipos de aire acondicionado en estos edificios por equipos de última tecnología.
- *Iluminación no residencial.* Esta intervención comprende acelerar el reemplazo de lámparas fluorescentes de baja eficiencia por dispositivos de iluminación T8 de alta eficiencia.<sup>6</sup>
- *Alumbrado público.* Esta intervención propone sustituir todo el inventario de lámparas de vapor de mercurio, incandescentes, halógenas (yodo-cuarzo) y fluorescentes del alumbrado público por lámparas de sodio de alta presión y alta eficiencia.
- *Motores industriales.* Esta intervención involucra la sustitución acelerada de los grandes motores industriales y la introducción de motores de alta eficiencia (superiores a la norma actual). Si bien el precio de los motores eficientes más que duplica el precio de los motores estándares, la intervención produce beneficios económicos netos.

### Cogeneración

- *Cogeneración en la industria.* El potencial estimado para cogeneración en la industria mexicana asciende aproximadamente a 6.800 MW, excluyendo la industria petrolera y la del azúcar. Este potencial está concentrado en industrias con requerimientos de vapor y donde se pueden utilizar sistemas de ciclo superior (*topping*). Se trata de una estimación conservadora, puesto que excluye los esquemas de cogeneración de pequeña y mediana escala. Las condiciones para utilizar plantas de ciclo inferior (*bottoming*) son menos favorables porque el calor de desecho de sectores como la industria del cemento y la siderurgia tiene una temperatura muy baja para utilizarlo eficientemente (CONUEE,

6 El gobierno federal está definiendo programas de gran escala para la refrigeración e iluminación residencial. Por lo tanto, es posible que las intervenciones propuestas en el estudio MEDEC formen realmente parte de la línea base.

2009).<sup>7</sup> La cogeneración permite posponer la construcción de nueva capacidad de generación de electricidad nueva por parte de las empresas eléctricas y conduce a un nivel de eficiencia global superior en el sistema energético.

- *Cogeneración con bagazo.* En la mayor parte de los ingenios azucareros en México actualmente operan plantas de cogeneración de baja eficiencia, que utilizan una mezcla de bagazo y combustóleo (*fuel oil*) y generan electricidad para consumo propio. Si éstas se reemplazaran por plantas de alta presión y alta eficiencia, los ingenios podrían generar excedentes de electricidad para la red y dejar de utilizar combustóleo.

### *Aplicaciones térmicas de las energías renovables*

- *Calentamiento solar de agua.* Este programa implica el aumento de la penetración de calentadores solares de agua para reducir el consumo de gas LP o gas natural, tanto en las casas actualmente existentes como en las nuevas. Se supone que para 2030, el 80% de las viviendas nuevas y el 60% de las viviendas existentes en 2008 tendrán instalados calentadores solares.
- *Estufas mejoradas de leña.* Esta intervención implica reemplazar los tradicionales fogones abiertos por dispositivos más eficientes en las viviendas rurales. Se supone que la penetración de este tipo de equipos para el 2030 alcanzará el 100% de los habitantes rurales que usan los tradicionales fogones abiertos. Las estufas o cocinas mejoradas reducen el consumo de leña y mejoran la eficiencia de la combustión, y por ende reducen tanto las emisiones netas de CO<sub>2</sub> vinculadas con la fracción no renovable de la biomasa como las emisiones de GEI distintos al CO<sub>2</sub> vinculadas con la combustión incompleta. Al menos dos programas de gobierno y varios proyectos no gubernamentales se encuentran actualmente en desarrollo en México, dando motivos para el optimismo de que se podrá alcanzar la tasa de penetración supuesta. Para ello, no obstante, será necesario proveer el apropiado nivel de capacitación, asistencia técnica y seguimiento, puesto que la mayoría de los programas en curso proveen fondos únicamente para la compra e instalación de estufas. Esta intervención produce

---

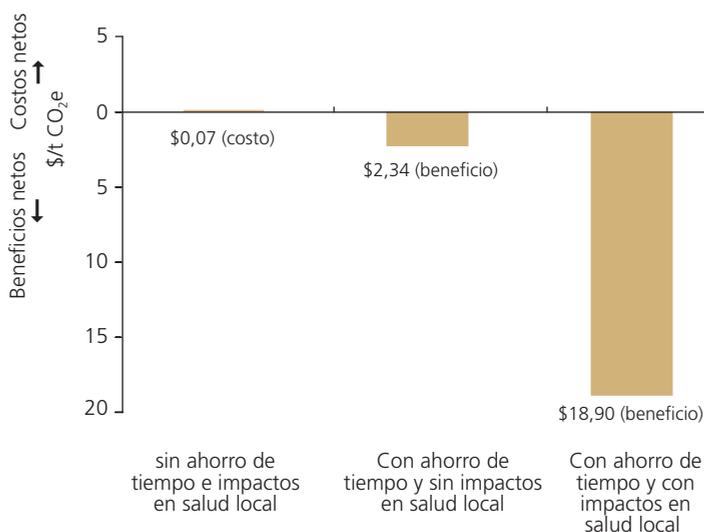
7 Asimismo, en el sector siderúrgico, los fluidos del calor de desecho son muy corrosivos y por lo tanto difíciles de manejar. Los proyectos de cogeneración son en términos generales de dos tipos básicos de ciclos de energía, de ciclo superior (*topping*) y de ciclo inferior (*bottoming*). El ciclo superior es el de más vasta aplicación en la industria y consiste en el aprovechamiento del calor de desecho proveniente de un proceso de generación de energía eléctrica o mecánica. El ciclo inferior utiliza el calor de desecho provisto por un proceso térmico, que por lo general es suministrado a una turbina de vapor, extrayendo vapor del proceso de calefacción y también generando electricidad (Sci-Tech Encyclopedia, 1997).

grandes beneficios netos cuando se incluyen los beneficios para la salud y los ahorros de tiempo (recuadro 4.1 y gráfico 4.5).<sup>8</sup>

**Recuadro 4.1** Reducción de emisiones, ahorros de tiempo y beneficios para la salud mediante el uso de estufas mejoradas

Las estufas mejoradas constituyen una herramienta costo-efectiva para reducir las emisiones de GEI incluso si no se tiene en cuenta el tiempo que los integrantes de la familia ahorrarían al no tener que juntar tanta leña como antes y los beneficios para la salud resultantes del menor impacto de la contaminación intramuros. Cuando se consideran los ahorros de tiempo y el impacto positivo sobre la salud al disminuir la exposición a partículas finas (PM2.5) y al monóxido de carbono, la intervención provee importantes beneficios para las familias y la sociedad. El beneficio neto de la intervención sube de prácticamente cero a \$2.34/tCO<sub>2</sub>e cuando se incluyen los ahorros de tiempo y a \$18.90 cuando se incluyen los beneficios de tiempo y para la salud. Dado que aproximadamente el 80% de la población rural en México depende de la leña para cocinar y calentar agua (Armendáriz *et al.*, 2008), es significativo el potencial de mitigación de GEI por la introducción generalizada de estufas mejoradas.

**Gráfico 4.5** Costos de mitigación de las estufas mejoradas



Fuente: Autores.

<sup>8</sup> El presente informe se basó en varios trabajos de investigación que se han realizado recientemente sobre el impacto en la salud y en el cambio climático por la adopción de estufas mejoradas en México (Armendáriz *et al.*, 2008; Johnson *et al.*, 2008, y 2009).

**Cuadro 4.1** Resumen de las intervenciones MEDEC en los sectores de uso final de energía estacionario

<i>Intervención</i>	<i>Reducción anual máxima de emisiones (Mt CO<sub>2</sub>e/año)</i>	<i>Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO<sub>2</sub>e)</i>	
Eficiencia en el uso final de electricidad	Aire acondicionado residencial	2,6	3,7 (beneficio)
	Iluminación residencial	5,7	22,6 (beneficio)
	Refrigeración residencial	3,3	6,7 (beneficio)
	Iluminación en edificios no residenciales	4,7	19,8 (beneficio)
	Aire acondicionado en edificios no residenciales	1,7	9,6 (beneficio)
	Alumbrado público	0,9	24,2 (beneficio)
	Motores industriales	6,0	19,5 (beneficio)
	Cogeneración	Cogeneración en industrias	6,5
Cogeneración con bagazo		6,0	4,9 (costo)
Aplicaciones térmicas de las energías renovables	Calentamiento solar de agua	18,9	13,8 (beneficio)
	Estufas mejoradas de leña	19,4	2,3 (beneficio)

Fuente: Autores.

El cuadro 4.1 resume las intervenciones relacionadas con el uso final de energía, casi todas del tipo “ganar-ganar”. Se analizaron y evaluaron otras intervenciones en los sectores de uso final de energía pero finalmente no fueron incluidas en el escenario MEDEC, porque no cumplían con los criterios de este estudio, porque no había información disponible o por otras razones. En particular, el bombeo de agua para riego, abastecimiento de agua o drenaje tiene un importante potencial de mitigación, y se podrían aprovechar numerosas oportunidades para recuperar la energía de presión por medio de turbinas hidráulicas. La falta de datos apropiados impidió el análisis exhaustivo de estas intervenciones.

### **Barreras a la mitigación de gases de efecto invernadero**

Las barreras para mejorar la eficiencia en los usos finales de energía ya han sido ampliamente analizadas y varias políticas e instrumentos para eliminar dichas barreras han tenido éxito (cuadro 4.2). Los métodos y procesos para la eliminación de barreras son con frecuencia tan diversos como el país o la localidad en los que se aplican.

**Cuadro 4.2** Eficiencia en el uso final de energía: barreras y acciones correctivas

Barrera	Acciones correctivas
<b>Sectores industrial y comercial</b>	
Conocimiento limitado sobre eficiencia energética, incluyendo costos, beneficios y riesgos de tecnologías y acciones nuevas	Campañas de concientización en la industria sobre oportunidades de eficiencia energética, seminarios y exposiciones sobre tecnología
Pocos ejemplos que presenten casos empresariales prácticos para eficiencia energética; datos limitados sobre los mercados, y pocas oportunidades identificadas para fomentar la participación del sector privado	Desarrollo y divulgación de información sobre eficiencia energética, guías técnicas, estudios de caso, bases de datos de proyectos, y estudios de referencia ( <i>benchmarks</i> )
Falta de conocimientos especializados para realizar auditorías de calidad e identificar oportunidades de eficiencia energética; falta de conocimientos técnicos para presentar propuestas de proyectos que sean aceptables para los bancos	Capacitación técnica de los gerentes de energía, ESCO y auditores; desarrollo de modelos estandarizados para informes de auditorías, bases de licitación y estudios de caso
Elevados aranceles de importación aplicados a los equipos para la eficiencia energética	Establecer exenciones impositivas y arancelarias o incentivos para las compras de equipos para la eficiencia energética
Baja calidad o calidad cuestionable de los equipos para la eficiencia energética	Actualizar y ampliar las normas, etiquetas y códigos de eficiencia energética
Altos costos de desarrollo de proyectos (auditorías) y costos de transacción	Desarrollar procedimientos de préstamo, protocolos de control y verificación, y documentos de licitación estandarizados; asignar fondos para auditorías energéticas
Inversión limitada del sector privado en eficiencia energética (para auditorías, servicios de asesoramiento, arrendamiento y ESCO) por el capital limitado y el financiamiento disponible	Desarrollar modelos locales de negocios/ESCO; promover las opciones de consorcio de empresas ( <i>joint ventures</i> ) y fondos para capital de riesgo; realizar pequeños donativos para estimular el mercado y las ESCO
Conocimiento especializado limitado en los bancos para evaluar propuestas de eficiencia energética, solicitudes de préstamo de baja calidad, altos riesgos percibidos para los proyectos de eficiencia energética	Proveer asistencia técnica a las instituciones financieras y realizar demostraciones de desempeño de proyectos
Responsabilidad e incentivos poco claros entre desarrolladores inmobiliarios, propietarios e inquilinos (problema del "agente principal")	Mejores códigos y certificados para edificios; incentivos para edificios verdes; medición de consumos de energía
Escasa solvencia de los clientes o limitada capacidad de endeudamiento entre los prestatarios	Crear esquemas específicos de financiamiento (fondos rotatorios, carteras de financiamiento); mecanismos para mejorar el crédito, y modelos alternativos de financiamiento para compartir los riesgos en los proyectos de eficiencia energética

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación cuadro 4.2)

<i>Barrera</i>	<i>Acciones correctivas</i>
<b>Sector público</b>	
Conocimiento limitado sobre la eficiencia energética, incluyendo sus costos, beneficios, riesgos y opciones de servicio	Campañas de concientización destinadas a los administradores públicos; estudios de casos
Incentivos limitados para implementar proyectos de eficiencia energética (debido a la potencial pérdida de presupuesto) y para explorar nuevos métodos	Revisar el presupuesto para permitir la retención de los ahorros de energía; premios para los organismos públicos o para los funcionarios que mejoren la eficiencia energética
Normas restrictivas para presupuestación, financiamiento, y adquisición y contratación	Revisar las políticas públicas para fomentar los productos de eficiencia energética (por ejemplo, determinación de costos de ciclo de vida) y las ESCO; desarrollar modelos alternativos de ESCO que se adapten a las condiciones locales; crear fondos rotatorios específicos para eficiencia energética para organismos públicos
<b>Sector residencial</b>	
Conocimiento limitado sobre la eficiencia energética, incluyendo sus costos, beneficios y riesgos	Campañas públicas de concientización sobre eficiencia energética
Desconocimiento sobre qué productos son realmente eficientes, cuáles son los costos y ahorros reales, la calidad y la confiabilidad; elevados costos iniciales de inversión, elevados costos de transacción	Actualizar y ampliar las normas, etiquetas y códigos de eficiencia energética; realizar negociaciones con los fabricantes; procurar la transformación de los mercados (por ejemplo, a través de compras en grandes cantidades); ofrecer información sobre costos y ahorros de energía a través de las facturas eléctricas, establecer mecanismos para inversiones en eficiencia energética financiadas por las empresas eléctricas
Precios de la energía muy bajos	Reformas institucionales y modificaciones a los precios de la energía
Responsabilidad e incentivos poco claros entre desarrolladores inmobiliarios, propietarios e inquilinos (problema del "agente principal")	Mejores códigos y certificados para edificios; incentivos para edificios verdes

Fuente: Autores.

### *Los sectores industrial y comercial*

Para los sectores industrial y comercial, el problema más frecuente es institucional: Las personas responsables de tomar decisiones, incluyendo los ejecutivos de las áreas de

administración y finanzas, por lo general tienen otras prioridades de inversión, como el mantenimiento y las reparaciones esenciales, la ampliación de la producción y el mejoramiento de la calidad del producto. Por lo tanto, le otorgan una prioridad muy baja a las inversiones para reducir los costos operativos. Numerosos países han desarrollado modelos de negocio de empresas de servicios energéticos (ESCO), a menudo junto con fondos destinados a la eficiencia energética, que permiten a los gerentes de las empresas pagar con los ahorros de energía y evitar de este modo el alterar las prioridades de inversión o asumir riesgos técnicos o de desempeño adicionales. Lamentablemente, los modelos de ESCO de los países industrializados, que se sustentan en contratos legales detallados, a menudo han resultado demasiado complejos para su implementación en muchos países en desarrollo y han demostrado ser inviables. Existen cada vez más experiencias en el desarrollo de modelos ESCO locales, que están teniendo mayor éxito (ver Taylor *et al.*, 2008).

En México se han realizado desde 2004 varios esfuerzos tendientes a promover la eficiencia energética con una orientación de mercado, en su mayor parte dirigidos a programas específicos de financiamiento de eficiencia energética.<sup>9</sup> Si bien han tenido lugar algunas propuestas innovadoras y prometedoras, una brecha fundamental ha sido el modelo de negocio subyacente necesario para darle sustento a la transacción. A menudo existe una creencia errónea de que si un banco determina que un cliente no es solvente, la ESCO puede financiar el proyecto. La realidad es que en general las ESCO no pueden y no están dispuestas a asumir los riesgos tanto del desempeño del proyecto como del crédito. Asimismo, las ESCO nuevas en los países en desarrollo con frecuencia cuentan con experiencia limitada y balances exiguos, y no podrán asimilar todos los riesgos del desempeño y enfrentar los altos costos de desarrollo, monitoreo y verificación de los proyectos. Es mucho más probable que un desarrollo más sólido de modelos diseñados en México, junto con progra-

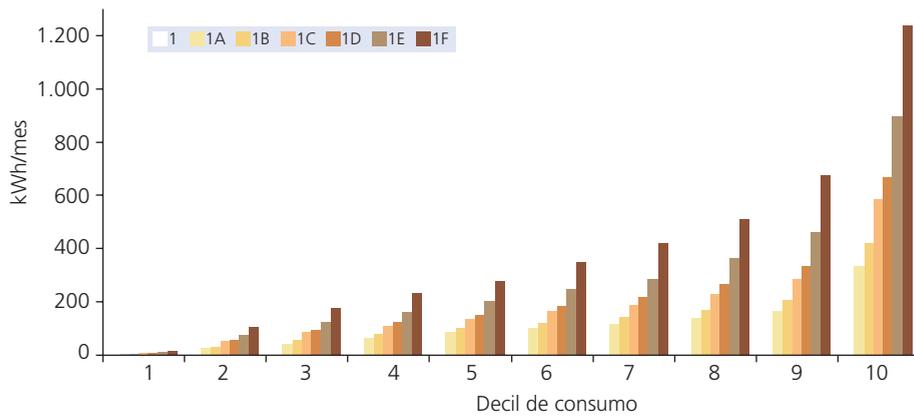
9 Los esfuerzos mencionados comprenden el estudio de financiamiento de eficiencia energética de la Agencia para el Desarrollo del Comercio de los Estados Unidos (USTDA) y Nacional Financiera (NAFIN, el banco de desarrollo más grande de México) (USTDA/NAFIN), los protocolos de financiamiento para eficiencia energética desarrollados por el Mecanismo de Cooperación Económica Asia- Pacífico (APEC) y la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) (APEC/CONAE), el vehículo de financiamiento de propósito especial para la eficiencia energética desarrollado por el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energía (ESMAP) y el Banco de Desarrollo de América del Norte (NADB) (ESMAP/NADB), el mecanismo de riesgo de desempeño y crédito desarrollado por la Asociación para la Eficiencia Energética y las Energías Renovables (REEEP), EPS Capital Corporation y NAFIN, y varios programas de financiamiento de eficiencia energética/energía limpia desarrollados por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), el Fondo de Tecnología Limpia, Fondelec Capital Advisors, NADB, el Banco Japonés de Cooperación Internacional (JBIC) y NAFIN.

**Recuadro 4.2** *Los subsidios a las tarifas residenciales y la subvaluación de la electricidad*

Como resultado de la subvaluación de la electricidad para los consumidores residenciales en México, existe un sobreconsumo y excesivas emisiones de GEI (Komives y otros 2009). Los subsidios a la electricidad en México se encuentran entre los más altos del mundo (\$9.000 millones en 2006). Más de dos tercios del total de subsidios a la electricidad se destinan a los consumidores residenciales. Los precios promedio de la electricidad para consumo residencial solamente cubren aproximadamente el 40% del costo del suministro, mientras que las tarifas del consumo agrícola sólo cubren aproximadamente el 30%. La relación precio/costo para los otros sectores (comercial e industrial) está mucho menos distorsionada, cubriendo las tarifas el 83-97% del costo del suministro.

Los niveles de consumo en el sector residencial en México varían radicalmente de acuerdo con las zonas tarifarias (gráfico). Tal como era de esperarse, el consumo es mucho más elevado entre los clientes que pagan tarifas menores en las áreas geográficas más altamente subsidiadas (es decir, aquellas zonas con temperaturas de verano más altas). El consumo promedio en el quinto decil de la tarifa 1 (la que tiene el mínimo subsidio) es de sólo 97kWh por mes por vivienda, mientras que el consumo promedio en el mismo decil para los consumidores de la Tarifa 1F (con subsidio máximo) es de 277kWh por mes. La diferencia entre los niveles de consumo en el decil 10 es aún más alta: los consumidores de los volúmenes más altos de la tarifa 1 utilizan 270kWh por mes en promedio, comparado con 1.240kWh de la Tarifa 1F.

*Consumo mensual de electricidad por categoría de tarifa y decil de consumo*



Fuente: Komives et al., 2009.

El menor precio de la electricidad reduce los incentivos para que los clientes adopten medidas de ahorro de energía, como el reemplazo de equipos y aparatos obsoletos. La elevada demanda de electricidad conduce a mayores emisiones en las centrales eléctricas, no sólo de gases de efecto

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación recuadro 4.2)

invernadero, sino también de contaminantes locales, como partículas y precursores del ozono, que son responsables de la mayor parte del impacto de la contaminación del aire sobre la salud. Además, los subsidios a la electricidad para el bombeo para riego en México han conducido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos en muchas regiones del país.

El grueso de los subsidios a la electricidad de México está destinado a los que no carecen de recursos. En 2005 los tres deciles inferiores residenciales de ingresos representaban aproximadamente el 21% del total de subsidios, mientras que los tres deciles superiores representaban el 38%. En cambio, el programa piloto Oportunidades Energéticas tiene una distribución muy progresiva de los recursos entre las distintas clases de ingresos, dirigiéndose casi el 75% de los pagos a los tres deciles inferiores de ingresos.

Fuente: Komives y otros, 2009.

mas de financiamiento definidos con base en estos modelos, resulte en inversiones significativas en eficiencia energética en los sectores industrial y comercial.

### *El sector residencial*

Los subsidios a la electricidad para los consumidores residenciales de medianos y altos ingresos desalientan muchas inversiones en aparatos electrodomésticos e iluminación eficientes. La mayoría de los consumidores de electricidad en México reciben subsidios y son los consumidores del sector residencial y del sector agrícola los que están más fuertemente subsidiados (recuadro 4.2).

El sector residencial es complejo, por la naturaleza diversa del sector, la enorme cantidad de viviendas y a menudo el limitado ingreso disponible. Una cuestión importante son las elevadas tasas implícitas de descuento que las familias utilizan cuando toman decisiones para inversiones en eficiencia energética. Por otra parte, si el costo adicional del aparato electrodoméstico o equipo es más alto, es menos probable que sea adoptado, independientemente del costo del ciclo de vida. Los programas que pueden reducir los costos (por ejemplo, compra en grandes cantidades, negociaciones con el fabricante, subsidios o reembolsos), que garantizan la calidad del producto y la costo efectividad, y que proveen un mecanismo de distribución eficiente y efectiva, tienen buenos antecedentes. México ya cuenta con una sólida experiencia en la implementación de programas de aparatos electrodomésticos residenciales y ha hecho frente a este tipo de dificultades con anterioridad. La ampliación de este tipo de programas, particularmente apuntando al aire acondicionado, la iluminación y el calentamiento solar de agua, podría resultar en un impacto significativo.

Varios programas y proyectos en México están dirigidos a la difusión de estufas mejoradas de leña (*ver* recuadro 4.1). Las barreras potenciales a la implementación

en gran escala de este tipo de programas incluyen la resistencia al cambio por parte de las comunidades rurales e indígenas, debido a sus tradiciones y hábitos, la falta de técnicas de construcción estandarizadas, la dificultad de alcanzar una población rural vasta y dispersa, la falta de personal capacitado tanto en los aspectos sociales como en los técnicos de la difusión de las estufas y los elevados costos de seguimiento.

### *El sector público*

El sector público enfrenta numerosas barreras relacionadas con los procedimientos y los incentivos. Los organismos gubernamentales a menudo tienen presupuestos restringidos que no les permiten realizar mejoras en los equipos, y si cuentan con tales presupuestos, los beneficios financieros normalmente no les corresponden. Las reglamentaciones que se aplican para las adquisiciones en general consideran sólo los costos iniciales, en vez de los costos del ciclo de vida, y la contratación de ESCO, que con frecuencia están involucradas tanto en la auditoría inicial como en la implementación del proyecto, es casi imposible de concretar.<sup>10</sup> México también tiene políticas de contratación muy restrictivas a nivel federal y estatal, que impiden que se adjudiquen contratos por un plazo superior a un año (por los ciclos presupuestarios y las obligaciones futuras), limitando así las inversiones en eficiencia energética.

Después de analizar estos problemas en 2005, la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) sugirió que, en lugar de realizar cambios radicales en las políticas de adquisiciones y presupuesto, el gobierno considerara implementar unos pocos programas piloto para probar los métodos alternativos. Los contratos simplificados para las ESCO, que podrían adaptarse para cumplir con las restricciones de un año de contrato y con requerimientos más simples de verificación del desempeño, podrían probarse y, con base en la experiencia adquirida durante su implementación, ajustarlos y replicarlos. A medida que estos esquemas de licitación tengan más aceptación, se podría poner mayor énfasis en agrupar múltiples instalaciones públicas para ampliar las inversiones y al mismo tiempo reducir los costos de transacción. Este esfuerzo podría complementarse con un fondo rotatorio, quizás en forma de concesión, para mejorar los incentivos destinados a los proyectos de eficiencia energética que se implementarán. Esta experiencia podría luego permitir una revisión más informada y exhaustiva de las políticas públicas que se deban analizar.

---

10 El hecho de que cada ESCO licite en un proyecto diferente, con distintos requerimientos de inversión, ahorros de energía, participación de los ahorros del cliente y otros detalles, puede dificultar la evaluación de la transparencia.

## Conclusiones

Las intervenciones de México relacionadas con la eficiencia energética, la cogeneración y las energías renovables en todos los sectores de uso final estacionario de energía deberían constituir un componente importante de la política de mitigación frente al cambio climático. Este aspecto se ha reconocido claramente en la Estrategia Nacional de Cambio Climático y en el PECC. Muchas de las intervenciones definidas en el estudio MEDEC aceleran o amplían las actividades que la CONUEE, el FIDE, el FIPATERM y otros organismos ya han emprendido.

Las intervenciones MEDEC son principalmente medidas de modernización o renovación que involucran el reemplazo de equipos existentes por equipos nuevos y energéticamente más eficientes. Puesto que la demanda de electricidad de México será más del doble para el 2030, es importante que los nuevos equipos cumplan con normas de desempeño energético cada vez más estrictas. En este sentido, México se beneficiará de la mayor coordinación con Estados Unidos y Canadá sobre normatividad. México también se beneficiaría de un esfuerzo concertado para detener el ingreso de equipos obsoletos e ineficientes procedentes de Estados Unidos. En el sector rural, la difusión de estufas mejoradas de leña representa un importante potencial para la mitigación de GEI, con cobeneficios adicionales.

Las normas de eficiencia energética para los edificios es un área donde México puede avanzar considerablemente. Para ello es necesario crear incentivos para que los gobiernos locales adopten y apliquen las normas federales de eficiencia energética en edificios comerciales e implementen normas (preferentemente) obligatorias de eficiencia energética para edificios residenciales, al menos en zonas de clima cálido con una elevada demanda de aire acondicionado.

Las ESCO pueden desempeñar un papel importante para avanzar en el plan de acción de eficiencia energética de México, especialmente en los sectores industrial, comercial y público. Para explotar este potencial es necesario un mayor apoyo para desarrollar y poner en práctica modelos piloto de negocios de las ESCO que se adapten a las condiciones imperantes en México. La reducción de los subsidios indiscriminados a las tarifas eléctricas residenciales y su sustitución por mecanismos apropiados de apoyo para las familias de bajos ingresos contribuirá a mejorar los incentivos para la conservación de la energía y la inversión en equipos residenciales más eficientes.

# 5

## Transporte

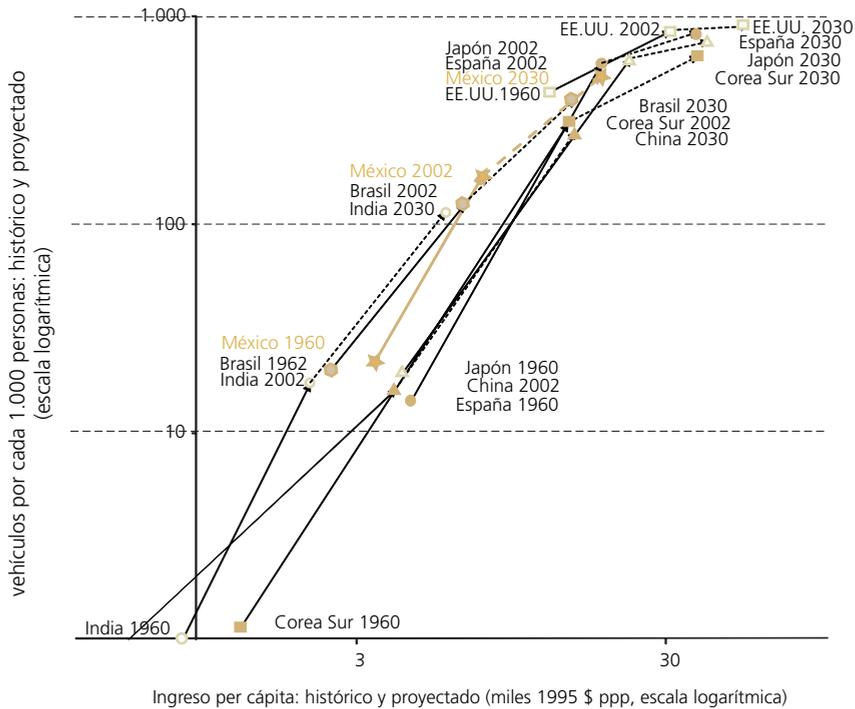
El sector transporte es el sector más grande y de más rápido crecimiento en México en términos de consumo de energía y emisión de GEI. Este sector está compuesto por los subsectores de autotransporte, aéreo, ferroviario y marítimo. El sector produce aproximadamente el 18% del total de emisiones de GEI en México, representando el autotransporte aproximadamente el 90% del consumo de energía y emisiones de estos gases del sector (SEMARNAT, 2007).

El uso de energía por parte del sector transporte en México más que se cuadruplicó entre 1973 y 2006, comparado con la casi duplicación del uso de energía por el sector industrial y otros (IEA, 2008a). El parque automotor del país casi se triplicó en una década, incrementándose de 8,3 millones de vehículos en 1996 a 21,5 millones de vehículos en 2006.

La importación de vehículos usados procedentes de Estados Unidos ha sido un factor importante que ha impulsado el crecimiento del parque automotor en México. También ha provocado un incremento en la edad promedio del parque automotor, que está a su vez acompañado por un bajo rendimiento y por altas emisiones de los contaminantes del aire ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  y partículas). Solamente en 2005, México importó 1,3 millones de vehículos de los Estados Unidos cuya antigüedad superaba los 10 años.

Las proyecciones señalan que durante los próximos 25 años, la tasa de motorización de México –definida como la cantidad de vehículos por cada mil habitantes– continuará creciendo, siguiendo una tendencia mundial (gráfico 5.1). Los factores importantes que explican el incremento del uso de vehículos en México son el aumento del ingreso per cápita, la disponibilidad de vehículos económicos (nuevos y usados) y el costo relativamente bajo de los combustibles para transporte. Otros factores que han contribuido al aumento del uso de la energía y a las emisiones de GEI en el sector transporte son el nivel de deterioro en la calidad del transporte público, el inadecuado cumplimiento de las normas de emisiones de gases de vehículos, el no considerar las necesidades del transporte en los planes de desarrollo urbano, y la falta de reglamentación para el transporte de carga.

**Gráfico 5.1** Parque vehicular: tendencia histórica y crecimiento proyectado para países seleccionados



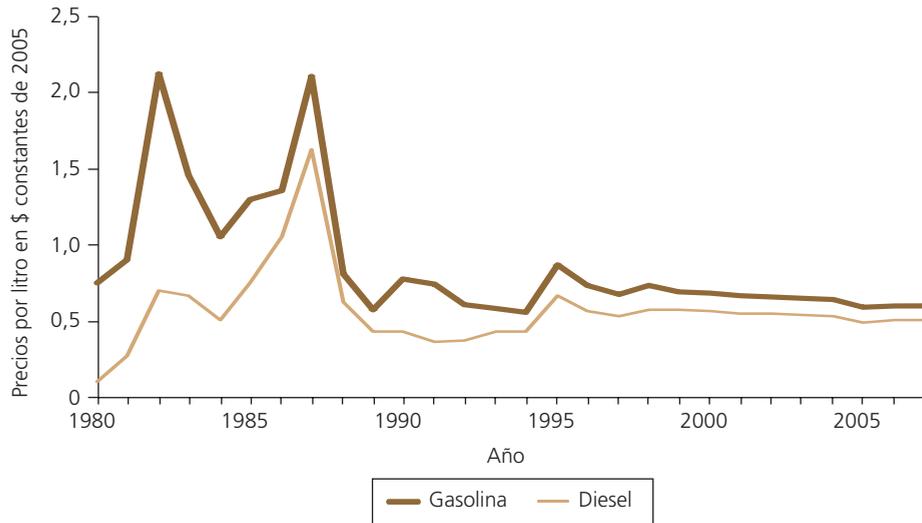
Fuente: Dargay, Gately y Sommer, 2007.

Un factor adicional que contribuye a la demanda de combustibles para transporte es el precio de los combustibles. Los precios de los dos combustibles principales para el autotransporte –gasolina y diesel– permanecieron estables o cayeron en los últimos 15 años en México (gráfico 5.2). Los precios de los combustibles en México son inferiores a los de la mayoría de los países que integran la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).

### El escenario de la línea base

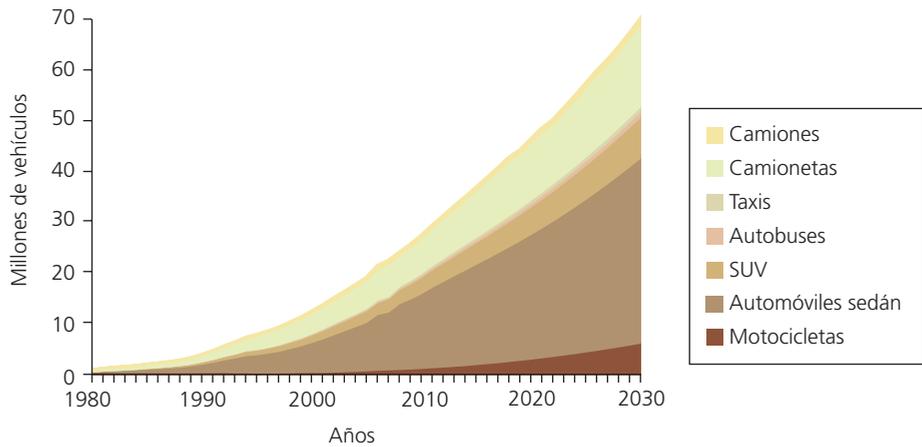
El escenario de la línea base sigue las tendencias históricas de México y es consistente con el patrón mundial de crecimiento de la motorización. En este escenario, el parque automotor nacional aumenta de 24 millones de vehículos en 2008 a poco más de 70 millones en el 2030 (gráfico 5.3). La mayor parte del incremento es por

**Gráfico 5.2** Precios de gasolina y diesel en México, 1980-2007



Fuente: CTS 2009.

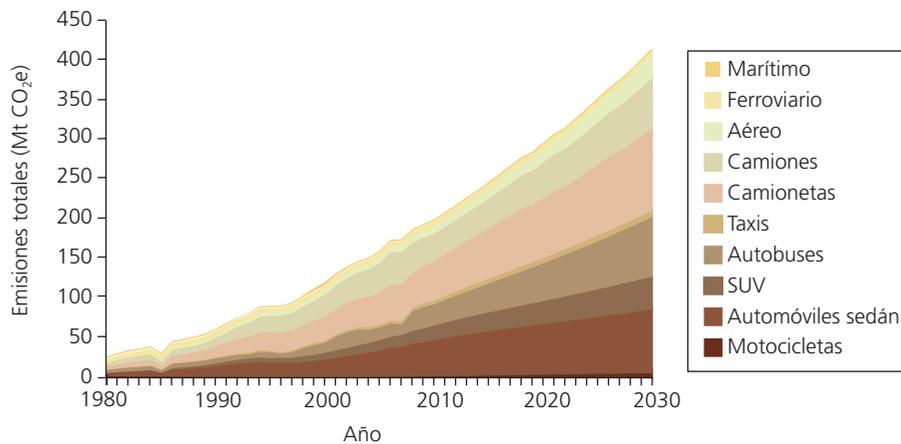
**Gráfico 5.3** Parque vehicular: tendencia histórica y proyección bajo el escenario de la línea base, 1980-2030



Fuente: Autores.

automóviles sedán, pero también hay un gran incremento en camionetas, autobuses y vehículos deportivos utilitarios (SUV). Las emisiones de GEI producidas por el sector transporte aumentan de 167 Mt CO<sub>2</sub>e en 2008 a más de 347 Mt CO<sub>2</sub>e en 2030, siendo el 72% de las emisiones (y consumo de energía) generado por los vehículos privados (automóviles sedán, SUV, camionetas y camiones) (gráfico 5.4). Las emisiones totales se incrementan de 659 Mt de CO<sub>2</sub>e en 2008 a 1.137 Mt de CO<sub>2</sub>e en 2030, subiendo la participación del sector transporte del 25% en 2008 al 31% en 2030 (gráfico 7.1).

**Gráfico 5.4** Emisiones de GEI de la línea base por modo de transporte



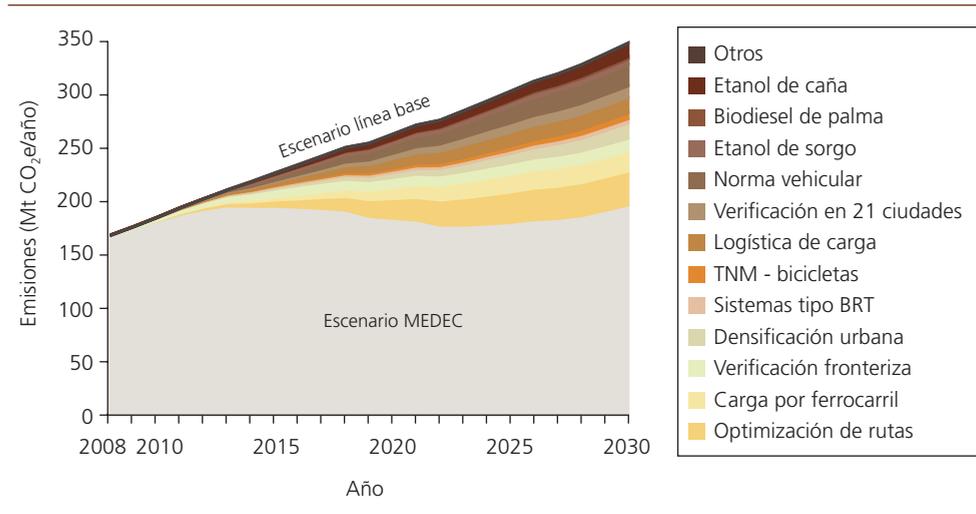
Fuente: Autores.

## El escenario MEDEC de bajas emisiones

El análisis del sector transporte utilizó un método programático para evaluar un conjunto integrado de nueve intervenciones de bajas emisiones.<sup>1</sup> El objetivo de dicho análisis fue identificar un escenario contundente que pudiera reducir drásticamente las emisiones de GEI producidas por el sector transporte en México. Las áreas prioritarias evaluadas en el estudio comprenden el uso del suelo urbano, combustibles y tecnologías, transporte público, transporte no motorizado, gestión de la demanda de viajes y transporte de carga.

1 El análisis de todas las intervenciones en el sector transporte estuvo a cargo del equipo de transporte.

**Gráfico 5.5** Emisiones del escenario MEDEC para el transporte



Fuente: Autores.

\* Obsérvese que este gráfico incluye todas las intervenciones que conducen a una reducción de las emisiones en el sector transporte, incluyendo tanto aquellas analizadas en el presente capítulo, como las intervenciones de biocombustibles detalladas en el capítulo siguiente.

### Cambios modales y desarrollo urbano

- Densificación urbana.** La densificación urbana procura promover una política para el desarrollo y preservación de los centros urbanos, utilizando criterios de sustentabilidad que ofrezcan condiciones de habitabilidad (acceso al trabajo, a escuelas y a comercios). La planificación urbana que contempla una mayor densidad hace posible reducir la demanda de transporte motorizado al mismo tiempo que revitaliza los centros urbanos con un uso del suelo mixto; recupera el paisaje urbano y reconstruye comunidades al proveer un acceso equitativo a los bienes y servicios, educación y mantenimiento de la calidad ambiental y urbana. La planificación urbana que contempla una alta densidad urbana impone límites al crecimiento en las zonas urbanas, afectando directamente el uso de los vehículos (privados y públicos) y el consumo de combustibles. El análisis costo-beneficio contempla cambios en la inversión en infraestructura (más baja en el escenario de alta densidad) y en los costos operativos (más altos en el escenario de alta densidad) y en las distancias de viaje (más cortas en las áreas de alta densidad).
- Sistemas de transporte tipo BRT.** Los sistemas de transporte tipo BRT consisten en el reemplazo de minibuses en las principales rutas troncales por sistemas de transporte rápido con autobuses del tipo que ya se ha implementado en

varias ciudades de México (Optobús en León, Metrobús en la Ciudad de México y Macrobús en Guadalajara), y que se conocen por su denominación en inglés *Bus Rapid Transit (BRT)*. Estos sistemas se instalarían en las ciudades mexicanas cuya población actual fuese superior a los 750.000 habitantes. El objetivo del programa es asignar 1,5 kilómetros por cada 100.000 habitantes de carriles BRT para el 2030, equivalente a 122 líneas de sistemas BRT, con un total de 1.830 kilómetros en todo el país. El análisis evalúa la mitigación que resulta cuando los pasajeros se pasan de otros medios de transporte más contaminantes (minibuses, así como automóviles y taxis) al sistema BRT.

- *Optimización de rutas de transporte público.* La optimización de rutas de transporte público se refiere a la reestructuración de las rutas secundarias del sistema de transporte masivo mediante la eliminación de los vehículos excedentes. Si la adopción de esta medida se complementa con mejoras en la infraestructura urbana (calles, paradas de autobús y señales de tránsito), información al público, monitoreo y control del tránsito y mejoras en los vehículos, constituye una alternativa importante para mitigar las emisiones de GEI en el transporte público urbano de pasajeros, porque el crecimiento del parque automotor privado (así como la expansión urbana sin control y la congestión, relacionadas con dicho crecimiento) ha sido en parte el resultado de sistemas de transporte público ineficientes.
- *Transporte no motorizado.* El transporte no motorizado (TNM) es una alternativa de movilidad que da prioridad a los peatones y ciclistas, en su mayor parte para viajes cortos. Es un medio de transporte eficiente, accesible y no contaminante, que es saludable y que tiene un valor recreativo. Los sistemas de transporte no motorizados formales se utilizan por lo general como sistemas secundarios de los sistemas de transporte masivo para los viajes de larga distancia; deben estar interconectados con los destinos de viaje más importantes (escuelas, centros de trabajo, comercios y sitios turísticos). En este escenario, el estudio propone que el 5% de los viajes se realicen en bicicleta a nivel nacional para el 2030. Los datos sobre costos y beneficios se basan en estudios realizados en ciudades que han implementado programas efectivos para la infraestructura del transporte no motorizado.

### *Tecnologías y gestión de la demanda*

- *Verificación vehicular fronteriza.* La verificación vehicular fronteriza reglamentaría indirectamente la eficiencia de los vehículos usados importados, al exigirles que cumplan con las normas ambientales mínimas. A los vehículos que excedan el nivel máximo del 2% de CO en volumen –20% de las importaciones en 2006– podrían ser importados a México.

- *Verificación vehicular en 21 grandes ciudades.* Se implementaría en 21 ciudades un programa de restricciones al uso de vehículos mediante verificación vehicular. El objetivo del programa sería desalentar el uso de los vehículos privados y permitir la promoción del transporte masivo sostenible. Según el marco legal vigente en México, la implementación de este programa descansa a nivel de las autoridades de estados o municipios, y sería políticamente difícil aprobarlo a nivel federal. Por lo tanto, esta intervención supone la adopción de un programa de verificación o inspección de vehículos similar al que actualmente rige en Ciudad de México, así como restricciones al uso de vehículos de mayor antigüedad, en 21 áreas metropolitanas, que abarcarían aproximadamente el 60% del parque automotor total de México (sin incluir Ciudad de México).
- *Norma vehicular.* Las normas de rendimiento de combustibles establecen un incentivo regulatorio para promover tecnologías más eficientes para los vehículos nuevos. Se evaluó una norma de eficiencia energética basada en el promedio ponderado de ventas, el consumo de combustible y la cantidad total de vehículos fabricados para su venta en el país, para medir su impacto en el consumo de energía y en las emisiones de GEI. Suponiendo un incremento en el precio de los vehículos como resultado de una norma tipo CAFE,<sup>2</sup> esta medida corre el riesgo de fomentar la venta de automóviles usados, lo cual podría reducir el rendimiento promedio si se implementara en forma aislada. Por lo tanto, las normas para los nuevos vehículos deben ir acompañadas de mecanismos que desalienten la compra y propiedad de vehículos usados ineficientes, como las intervenciones de verificación vehicular que se describen más arriba.

### *Transporte de carga*

- *Logística de carga por carretera.* La logística de carga por carretera apunta a optimizar el transporte de carga mediante la coordinación de la operación de camiones. Incluiría la creación de empresas o cooperativas de carga, terminales especializadas, corredores de transporte de carga y sistemas de información. A pesar de los costos fijos más altos de la infraestructura y administración de las empresas, los costos netos (y las emisiones de carbono) serían menores, debido a la reducción de los viajes con el camión vacío.
- *Carga por ferrocarril.* El transporte de carga por ferrocarril supone que para el 2030 el 37% de la carga se transporte por ferrocarril, en comparación con 7,6%

---

2 La norma evaluada para México es similar a la norma de eficiencia para vehículos nuevos de Estados Unidos denominada “norma del promedio corporativo de la economía del combustible” (CAFE).

en el año 2007. El incremento en el transporte ferroviario ocurriría a expensas de la carga transportada por camión, si bien el transporte de carga por carretera continuaría creciendo en términos absolutos, impulsado por el crecimiento económico.

### Resumen

El análisis de las intervenciones relacionadas con el transporte urbano consideró los ahorros de tiempo asociados con la reducción de la congestión, así como el impacto positivo sobre la salud ocasionado por la reducción de las emisiones de contaminantes locales (recuadro 5.1). Aun cuando no se consideren estos cobeneficios, todas las intervenciones en el sector transporte muestran beneficios netos positivos para mitigar las emisiones de carbono (cuadro 5.1).

Se consideraron y evaluaron otras intervenciones en el sector transporte pero finalmente no se incluyeron en el escenario MEDEC, ya sea porque no cumplían con los criterios expuestos en el capítulo 1, porque no había información disponible o por otras razones. Estas intervenciones incluyeron la introducción de vehículos híbridos, cuyos costos de mitigación son muy superiores al umbral de \$25/tCO<sub>2</sub>e; la introducción de vehículos diesel (automóviles de pasajeros y SUV), cuyos costos de mitigación eran también altos; y otras intervenciones relacionadas con la gestión de la demanda de viajes, como restricciones al estacionamiento o cargos por congestión, sobre las que no había información adecuada disponible. Además del transporte de carga por ferrocarril, que se incluyó como una de las intervenciones MEDEC, el revivir el servicio de transporte ferroviario de pasajeros sería también una alternativa de mitigación prometedora, aunque con efectos menores.

### Barreras a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero

La implementación de las intervenciones mencionadas más arriba enfrenta barreras políticas, financieras y sociales. Una barrera importante para la optimización de los sistemas de transporte urbano es la falta de coordinación entre los distintos organismos que trabajan en las áreas de medio ambiente, planificación urbana y transporte, así como entre los distintos niveles de gobierno. El resultado típico ha sido la sobreoferta de transporte público de baja calidad y la falta de planeación integral del desarrollo y de la movilidad urbana.

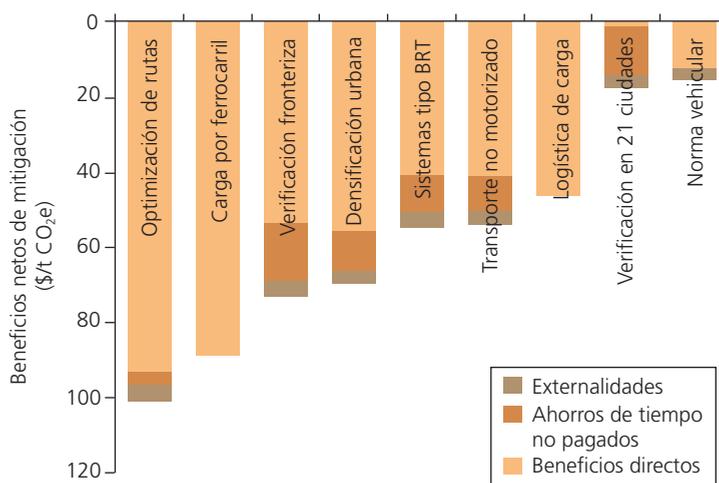
Las intervenciones relacionadas con el transporte masivo también enfrentan el desafío de modificar el marco institucional y a los actores involucrados en este subsector. En particular, la enorme cantidad de autobuses y minibuses, agrupados a menudo en pequeñas concesiones para las diferentes rutas, ha dificultado la implementación de sistemas tipo BRT o de programas de optimización del transporte masivo en México. El éxito de los BRT exige negociaciones con las empresas concesionarias de las rutas que

**Recuadro 5.1 Más tiempo y mejor salud: los cobeneficios de reducir las emisiones de carbono en el sector transporte**

Además de reducir las emisiones de carbono, todas las intervenciones en el sector transporte analizadas tienen cobeneficios significativos. Al reducir la distancia de viaje del parque automotor, la reducción de la congestión conduce a ahorros de tiempo. Asimismo, la reducción de las emisiones de contaminantes locales resulta en menores costos de salud al disminuir las enfermedades respiratorias.

Estos impactos sobre el tiempo y la salud se evaluaron para las siete intervenciones del estudio MEDEC no relacionadas con el transporte de carga (gráfico 5.6). El análisis evalúa los ahorros de tiempo que probablemente resultarían de las intervenciones, valorando en forma conservadora el tiempo al salario mínimo. El análisis en el área de salud utilizó factores de externalidades por litro de combustible consumido en las zonas urbanas, que se derivaron de un modelo que consideraba las estimaciones de la exposición a los contaminantes locales (PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub>) por la población afectada. La metodología se adaptó de un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2006), que utilizó las relaciones entre la exposición a contaminantes y los impactos sobre la salud, incluyendo la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, mortalidad por enfermedades pulmonares, mortalidad infantil por enfermedades respiratorias, bronquitis crónica, días no trabajados y días de actividad restringida. En conjunto, estos cobeneficios pueden ser significativos para algunas intervenciones en el sector transporte, constituyendo un motivo importante adicional para su implementación.

*Costos de externalidades y de tiempo para las intervenciones MEDEC de transporte*



Fuente: Autores.

**Cuadro 5.1** Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector transporte

<i>Intervención</i>	<i>Reducción anual máxima de emisiones (Mt CO<sub>2</sub>e/año)</i>	<i>Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO<sub>2</sub>e)</i>	
	Optimización de rutas de transporte público	31,5	96,6 (beneficio)
Cambios modales y desarrollo urbano	Densificación urbana	14,3	66,4 (beneficio)
	Sistemas de transporte tipo BRT	4,2	50,5 (beneficio)
	Transporte no motorizado	5,8	50,2 (beneficio)
Tecnologías y gestión de la demanda	Verificación vehicular fronteriza	11,2	69,0 (beneficio)
	Verificación vehicular en 21 grandes ciudades	10,6	14,5 (beneficio)
	Norma vehicular	20,1	12,3 (beneficio)
Carga	Logística de carga por carretera	13,8	46,3 (beneficio)
	Carga por ferrocarril	19,2	88,7 (beneficio)

Fuente: Autores.

operan a lo largo de los corredores planeados. También es necesario realizar estudios de demanda para identificar la ubicación óptima para los corredores, así como obtener asesoramiento técnico para la planificación y operación de los sistemas.

La barrera más importante a la restricción de vehículos mediante acciones de verificación vehicular es la falta de cumplimiento de las normas ambientales federales para las emisiones de gases de vehículos, cuyo cumplimiento depende de los gobiernos de los estados. Puesto que el principal beneficio de los programas de verificación es la reducción de los contaminantes locales, la mejor forma de hacer cumplir las normas es a través de la educación de la población respecto de los impactos sobre la salud de estos contaminantes. Los programas de verificación vehicular también pueden tener un impacto importante sobre la reducción de las emisiones de GEI, cuando restringen el uso de los vehículos de mayor antigüedad que son altamente contaminantes e ineficientes en cuanto a energía se refiere.

## Conclusiones

El actual sistema que alienta principalmente el uso del automóvil particular no es una opción sostenible para el sector transporte de México. Si bien el incremento en el parque vehicular en México es quizás inevitable, es posible reducir considerablemente

las emisiones de estos vehículos mediante la aplicación de políticas que mejoren su eficiencia, que procuren ampliar y mejorar el transporte público y que optimicen el movimiento de cargas. El análisis concluye que las nueve intervenciones del sector transporte evaluadas producen ahorros financieros y económicos, así como otros beneficios, incluyendo menores niveles de congestión, de contaminación y de emisiones de GEI.

Puesto que numerosas opciones de transporte son interdependientes y complementarias, es importante que los problemas de este sector se consideren con un enfoque holístico y programático en vez hacerlo como un conjunto de medidas individuales. Dado el patrón de urbanización histórico y proyectado en México, el transporte urbano y los problemas relacionados de planificación de uso del suelo constituirán factores fundamentales en el uso de la energía en el sector transporte y las correspondientes emisiones de carbono. Mejorar el transporte urbano exigirá desarrollar mecanismos que integren el transporte público con los esfuerzos de planificación y desarrollo urbano por parte de los gobiernos federal, estatales y municipales. Si bien el desarrollo de bajas emisiones puede ser una consideración adicional, los motores subyacentes de las políticas de transporte sostenible serán el acceso eficiente, seguro y limpio a la escuela, al trabajo, a los comercios y a los barrios.



## 6 Sector agrícola y forestal

El sector agrícola y forestal generó aproximadamente 135 Mt CO<sub>2</sub>e de emisiones de GEI en 2002 (PECC, 2009), correspondiéndole el 21% del total de las emisiones de este tipo en México. Dos tercios de esas emisiones fueron producidas por las actividades de uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS, también conocidas por la abreviatura en inglés LULUCF), y el resto por la agricultura y ganadería. El presente capítulo examina un conjunto de intervenciones en el ámbito rural para reducir las emisiones provenientes de estos sectores. También se presentan varias intervenciones relativas a la energía de biomasa producida por cultivos, residuos de cultivos y leña sostenible que reducen las emisiones en otros sectores (transporte, electricidad, industria y residencial) al reemplazar el uso de energía generada por combustibles fósiles.

La superficie de México es de 198 millones de hectáreas, de las cuales el 15% se utiliza para cultivos agrícolas y el 58% para las distintas formas de de pastizales. Los bosques abarcan 67 millones de hectáreas o el 34% de la superficie del país. En 2006, los sectores agrícola, forestal y pesquero representaron el 5,4% del PIB (SAGARPA, 2007a).

Se ha identificado al sector forestal como una de las áreas clave para la mitigación de las emisiones de GEI en México (Masera *et al.*, 2001), en lo que se refiere a evitar las emisiones a través de acciones como la reducción de la deforestación, así como la captura de carbono en los suelos y biomasa forestales.

Son menos las medidas costo-efectivas para reducir las emisiones de GEI en el subsector agrícola. La producción de cultivos con labranza cero pareciera ser una tecnología prometedora para México para reducir el uso de energía y contribuir a la vez al secuestro de carbono en suelo. La producción de biocombustibles líquidos enfrenta barreras financieras y económicas, y hace falta continuar con las tareas de investigación y desarrollo sobre otras medidas de bajas emisiones en los subsectores agrícola y ganadero.

La bioenergía producida por los sistemas agrícolas y forestales representa el 8% del consumo de energía primaria en México (408 petajoules), principalmente proveniente del consumo del leña (78%) y del bagazo de la caña de azúcar (22%). Unos 25 millones de personas que habitan en las zonas rurales de México –un cuarta parte de

las familias mexicanas– utilizan leña, principalmente para cocinar.<sup>1</sup> La leña también se utiliza en muchas industrias pequeñas, como la cerámica y fabricación de ladrillos. El bagazo de la caña de azúcar es el combustible básico que se utiliza en los ingenios azucareros. La bioenergía moderna ofrece un gran potencial para reducir las emisiones de GEI y contribuir a la diversificación de las fuentes de energía a mediano y largo plazo en México.

### El escenario de la línea base

En el escenario de la línea base, las emisiones de GEI del sector agrícola y forestal disminuyen levemente, de 100 Mt CO<sub>2</sub>e anuales en 2008 a 87 Mt CO<sub>2</sub>e en 2030. La agricultura y la ganadería representaron el 7% de las emisiones de GEI en México en 2002 (SEMARNAT e INE, 2006a) y el escenario base supone que estas emisiones permanecen aproximadamente en los mismos niveles en términos absolutos. El subsector forestal incide aproximadamente con el 14% de las emisiones de GEI, en su mayor parte debido a las actividades de deforestación. La línea base supone que las emisiones de GEI procedentes de este subsector permanecen constantes en términos absolutos pero que, con base en las actuales tendencias de reforestación y plantaciones, las emisiones netas producidas por el subsector forestal disminuyen levemente en las próximas décadas.

Históricamente, en México se han observado tres modelos de deforestación: a) desmonte de bosques templados tropicales y subtropicales de coníferas para la agricultura de subsistencia y el pastoreo de ganado; b) deforestación de los bosques tropicales debida a la colonización bajo la reforma agraria; y c) desmontes para actividades de ganadería y agricultura de gran escala. Las actividades de deforestación por parte de los pequeños campesinos ha ido decreciendo en los últimos 20 años por la migración urbana, y la colonización agraria apoyada por el gobierno oficialmente ha llegado a su fin.<sup>2</sup> El desmonte

- 1 En el capítulo 4 se analiza una intervención que contempla estufas mejoradas de leña.
- 2 La reforma agraria en México, que comenzó en la década de 1930 y continuó hasta 1992, asignó más de 100 millones de hectáreas –casi la mitad del territorio nacional y aproximadamente dos tercios del total de la propiedad rural del país– a los mexicanos que habitaban en zonas rurales, quienes crearon 30.000 *ejidos* y comunidades. La transferencia de la tierra incluyó ciertas restricciones, como la obligación de cultivar activamente la tierra y la prohibición de venderla o arrendarla, además de restricciones sobre la transferencia intergeneracional de la tierra. Algunos de los proyectos de colonización de la tierra impulsados por el gobierno fueron decepcionantes: vastas áreas forestadas fueron desmontadas para actividades agrícolas que nunca alcanzaron sus niveles de producción propuestos. El desmonte se hizo en bosques y ecosistemas naturales no sólo para fines agrícolas sino también para pastizales y desarrollo del turismo. Estos proyectos favorecieron intereses creados y prestaron poca atención a los impactos ambientales del desmonte. A diferencia de otros países en

de los bosques para actividades de agricultura de gran escala podrá ser más o menos intenso en el futuro, dependiendo de las condiciones del mercado y de la política del gobierno sobre el uso del suelo.

### El escenario MEDEC de bajas emisiones

El estudio identificó y evaluó intervenciones de mitigación dentro de los subsectores agrícola, ganadero, forestal y de bioenergía.<sup>3</sup> Doce intervenciones cumplieron con los criterios de reducción de emisiones, cuestan menos de 25/t CO<sub>2</sub>e y se consideraron factibles de implementar, con base en los programas existentes y programas pilotos implementados en México y en otros países. El potencial para todas las intervenciones en el sector agrícola y forestal fue evaluado por medio de un sistema de información geográfica que incluía las principales características del territorio de México (gráfico 6.1). Todas las intervenciones cumplen con las reglamentaciones establecidas para el uso del suelo, como la reserva de áreas para conservación, y evitan la competencia entre la producción de alimentos y la bioenergía.

#### Subsector forestal

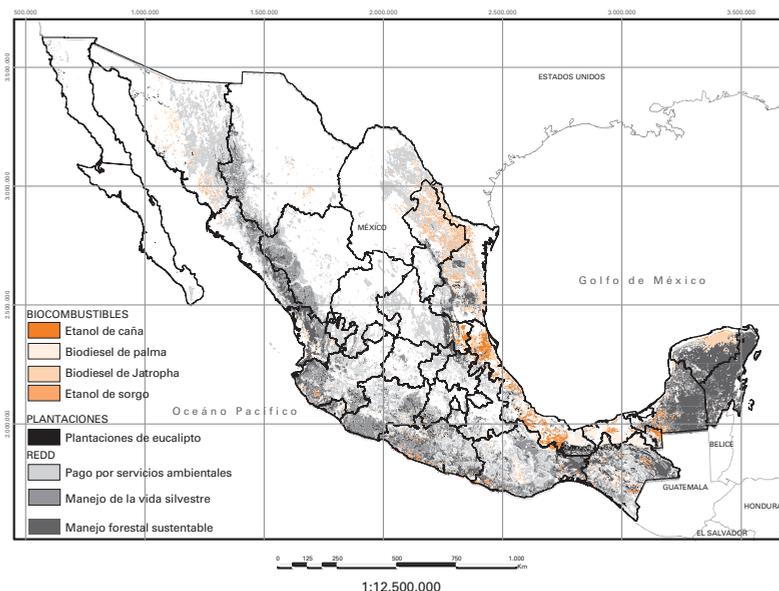
Las intervenciones forestales del estudio MEDEC incluyen distintos programas de manejo forestal y de producción de biomasa. Las intervenciones en este subsector se pueden dividir en aquellas que reducen las emisiones producidas por la deforestación y degradación de los bosques (REDD)<sup>4</sup> y aquellas que involucran la reforestación o

---

Latinoamérica, la distribución de la tierra en México contribuyó a la estabilidad social de las décadas de 1970 y 1980. No obstante, el costo de la paz social mexicana se pagó con el capital natural de los trópicos. En 1992 el marco legal agrario fue actualizado y se introdujo una serie de reformas legales y de política –el Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares (PROCEDE)–, incluyendo un programa de regularización de derechos sobre la tierra que apuntaba al “sector social”. Entre otras cosas, el programa autorizaba a los *ejidos* a constituir consorcios con empresas privadas, levantó la prohibición sobre el arrendamiento de la tierra y autorizó la venta con algunas restricciones de tierras destinadas a mantener las parcelas dentro de las manos de la comunidad local (de Dinechin y Larson, 2007).

- 3 Todas las intervenciones detalladas en el presente capítulo fueron analizadas por el equipo de uso del suelo y bioenergía. El equipo del sector electricidad participó en la generación de electricidad con biomasa y en la co-combustión con leña.
- 4 Para fines del presente estudio, deforestación se define como el cambio de bosque a cualquier otra categoría de uso de la tierra. Este estudio también supone que en tales casos toda la biomasa que se encuentra por encima del suelo del bosque se convierte en emisiones de GEI. Por el contrario, se supone que la degradación de la tierra provocará solamente una pérdida parcial de la biomasa forestal.

Gráfico 6.1 Distribución geográfica de las intervenciones en el sector agrícola y forestal



Fuente: Ghilardi y Guerrero 2009, basado en REMBIO 2008; INEGI 1995, 2000, 2002.

Nota: El manejo forestal sustentable comprende todas las intervenciones que involucran el uso productivo de la biomasa (generación de electricidad con biomasa, co-combustión con leña, producción de carbón vegetal y manejo forestal). No se incluyen las áreas aptas para reforestación y restauración o para maíz con labranza cero. Se incluye el biodiesel de jatropha, intervención que no está incluida en el escenario MEDEC por su elevado costo neto de mitigación.

plantaciones en tierras deforestadas o degradadas (cuadro 6.1). Las intervenciones REDD se pueden dividir en aquellas que conllevan alguna forma de uso productivo de la biomasa leñosa y aquellas que no. Cuando la biomasa leñosa se utiliza como combustible (intervenciones de generación de electricidad con biomasa, co-combustión con leña y producción de carbón vegetal), desplaza el uso de combustibles fósiles. Estas intervenciones por lo tanto reducen las emisiones de carbono tanto a través de una estrategia REDD como del efecto de la bioenergía. En conjunto las seis intervenciones REDD comprenderían el manejo y/o la protección de 65 millones de hectáreas de bosques, resultando en una tasa de deforestación y degradación igual a cero en 2030 (CONAFOR, 2001).<sup>5</sup>

5 Desde 2001 el gobierno ha asignado un presupuesto siempre creciente para el sector forestal y la reducción de la deforestación y la degradación de los bosques son componentes clave del Programa Estratégico Forestal para México 2025. En 2007 los distintos programas de apoyo

*Generación de electricidad con biomasa.* La generación de electricidad con biomasa implica la utilización de leña producida en bosques manejados de manera sostenible. Se supone que la madera en rollo, que representa el 30% del total de producción de madera, se vende para otros fines y que los residuos provenientes del aclareo y de la tala se utilizan con fines energéticos. El manejo forestal sostenible estaría acompañado por medidas destinadas a detener la deforestación y la degradación de los bosques. Se construirían doscientas centrales eléctricas pequeñas (cada una con una capacidad de 25 MW) en regiones de bosques nativos. Esta intervención intensiva en mano de obra crearía aproximadamente 200.000 empleos en todo el país. Si bien no hay experiencia con este tipo de tecnología de generación de electricidad en México, en otros países su uso es amplio, incluyendo Austria, Suecia y Estados Unidos.

*Co-combustión con leña.* La co-combustión con leña, que implica la mezcla de hasta el 20% de leña con combustibles fósiles, utiliza leña producida bajo las mismas circunstancias que en la intervención detallada más arriba, que luego es mezclada con carbón para generar electricidad. De las tres centrales eléctricas de carbón en México, la planta de Petacalco de 2.100 MW (en el estado de Guerrero) es la única que está ubicada próxima a los bosques que pueden proveerle un suministro adecuado de leña. La intervención está por lo tanto limitada a esta planta e implica inversiones en modificaciones para permitir el manejo de leña y su mezcla con el carbón mineral.

*Producción de carbón vegetal.* Aproximadamente 0,6 millones de toneladas de carbón vegetal o carbón de leña se producen cada año en México para satisfacer las necesidades de los sectores residencial y comercial. Esta intervención incrementa la producción de carbón vegetal en 13 veces para satisfacer el aumento en la demanda urbana y reemplazar el 75% de la demanda de coque en la industria. Asimismo, implica la sustitución de los hornos de tierra tradicionales por hornos de ladrillo más eficientes. Se supone que los hornos eficientes de carbón vegetal suministrarían el 70% del consumo urbano de carbón de leña para el 2030 y satisfarían el 100% de la demanda industrial. Actualmente no hay programas específicos del gobierno para la implementación de hornos de ladrillo eficientes para la producción de carbón vegetal. Sin embargo, esta tecnología está muy difundida a escala internacional. Como en el caso de las dos intervenciones anteriores, la producción de carbón vegetal supone que las prácticas del manejo forestal sostenible reducen la deforestación y degradación.

---

para el desarrollo forestal se unificaron en un solo programa conocido como ProÁrbol. Este programa comprende los pagos de transferencia directa a los propietarios de las tierras, a través de varios subprogramas diseñados para conservar los bosques, restaurar las áreas degradadas y reforestar tierras. El programa incluye entre sus mecanismos la asistencia financiera a las comunidades para el control de incendios forestales, el manejo de plagas y la introducción de estufas de leña eficientes en las zonas rurales. El escenario MEDEC supone que este programa sería continuado y ampliado.

*Manejo forestal.* El manejo forestal es la última de las cuatro intervenciones que reducen la deforestación y degradación de los bosques a través de la producción sostenible de biomasa leñosa. A diferencia de las tres intervenciones anteriores, que utilizan la biomasa como combustible y, por ende, como sustituto de los combustibles fósiles, en esta intervención la biomasa leñosa se utiliza como madera o para otros fines no energéticos.

*Manejo de vida silvestre.* El manejo de vida silvestre involucraría ampliar las actividades y experiencias de un programa en curso del gobierno federal que provee certificación para las Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (conocidas por su abreviatura UMA). Se supone que el ingreso proveniente del manejo de vida silvestre (principalmente bajo la forma de permisos de caza) permitiría que las UMA reduzcan la deforestación y la degradación de los bosques.

*Pago por servicios ambientales.* El pago por servicios ambientales ampliaría un programa vigente del gobierno que estipula pagos directos en efectivo a los propietarios de los bosques a cambio de la protección de los mismos. Se supone que el pago sería igual al costo de oportunidad de usar la tierra para otros fines y permitiría a los propietarios implementar mecanismos para reducir la deforestación y degradación de los bosques.

Las primeras seis intervenciones apuntan a reducir la deforestación y la degradación de los bosques a través de la producción sostenible de biomasa u otros mecanismos. Otras dos intervenciones, plantaciones comerciales, y reforestación y restauración, apuntan a restaurar los bosques en áreas que ya han sufrido la deforestación.

*Plantaciones.* Las plantaciones (o “aforestación”) de eucaliptos y coníferas se pueden implementar en 1,5 millones de hectáreas de tierra, para la producción de madera comercializable para aserraderos, fábricas de papel, postes y leña. La supervivencia de los árboles plantados en estas plantaciones se supone que alcanza la tasa del 50% observada durante los últimos años. También se supone que el 50% del contenido de carbono de cada cosecha se emite a la atmósfera.

*Reforestación y restauración.* Esta intervención involucra la plantación de especies nativas en áreas donde se ha desmontado la vegetación nativa. A diferencia de las plantaciones, la reforestación y restauración no suponen utilización productiva alguna de los productos forestales. Mientras que las plantaciones utilizan suelos de alta calidad, la reforestación y restauración utilizan suelos de menor calidad (con menores costos de oportunidad).

### *Subsector agrícola*

El subsector agrícola incluye el cambio de prácticas agrícolas para la producción de maíz y la producción de biocombustibles. El maíz ha sido el cultivo más importante en México desde la época precolombina. De acuerdo con SIACON (2007), unos 8,2

millones de hectáreas estaban sembradas con maíz en 2006, equivalentes al 38% del área total plantada de México.

*Maíz con labranza cero.* Esta intervención involucra un incremento en el secuestro de carbono en el suelo (así como una pequeña reducción en el consumo de diesel). Labranza cero se define como el sistema de labranza que conserva al menos el 30% de la superficie cubierta con residuos de la cosecha, cobertura vegetal o basura después de la siembra.<sup>6</sup> La intervención supone que el área plantada con maíz por el sistema labranza cero se incrementa de 0,5 millones de hectáreas en 2008 a 3 millones de hectáreas en 2030, abarcando el 50% del área cultivada con maíz de forma comercial. La acumulación y descomposición de los residuos de las plantas provoca un incremento en el secuestro de carbono orgánico en el suelo. La disminución del consumo de diesel debido a la menor utilización de maquinaria agrícola también redundará en una leve caída en estas emisiones.

Dentro de la categoría de biocombustibles líquidos se encuentran las tecnologías actuales para la producción de etanol y biodiesel, que permiten sustituir el uso de gasolina y diesel derivados del petróleo. Para todas las intervenciones de biocombustibles, se supone que la tierra necesaria para la producción de materias primas proviene de pastizales o tierras de pastoreo, y que no se convierte tierra de otros cultivos, de bosques o de áreas protegidas para la producción de biocombustibles. Sin embargo, es imposible evitar algún nivel de competencia indirecta (por ejemplo, el desplazamiento de la tierra para pastizales puede aumentar los precios de las pasturas y hacer que se utilice más tierra de uso agrícola para pastizales).

*Etanol de caña.* Esta intervención comprende la instalación de 97 plantas de etanol, cada una de ellas con una producción de 170 millones de litros al año. Cada planta requeriría la producción de caña de azúcar de aproximadamente 30.000 hectáreas. La intervención supone que el uso del bagazo de caña permitiría que las plantas fuesen autosuficientes en energía y que vendiesen el excedente de electricidad a la red. Esta intervención reduciría las emisiones de GEI sustituyendo el uso de la gasolina por etanol en el transporte, así como el de otros combustibles fósiles por bagazo de caña en el sector eléctrico.

*Etanol de sorgo.* Esta intervención involucra la construcción de 19 plantas de etanol con una producción de 165 millones de litros anuales por cada planta. Cada planta de

---

6 La labranza mínima o labranza cero se ha implementado en México desde fines de la década de 1970 bajo una guía científica. Sus beneficios incluyen: menor erosión del suelo; mayor retención de humedad; menor compactación del suelo; menor consumo de energía; mejores propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; reducción de malezas y ausencia de malezas nuevas; menores costos de producción; mayor actividad biológica en el suelo; mejor desarrollo de los cultivos de raíces; y menor déficit hidráulico (Navarro, 2000; Pitty, 1997; Rojas, Mora y Rodríguez, 2002; SAGARPA, 2007a).

etanol requeriría la producción de sorgo grano de aproximadamente 160.000 hectáreas de tierra. Una importante fuente de ingresos en esta intervención proviene de la venta de pasta de destilería (o pasta de DDG, *dried distiler's grains*), un subproducto de la producción de etanol.

*Biodiesel de palma.* Esta alternativa implica la instalación de 21 plantas procesadoras con una capacidad de producción de aproximadamente 34.000 toneladas de biodiesel anuales por planta. Cada planta requiere aproximadamente 10.000 hectáreas de plantaciones de palmas de aceite. Los ingresos son generados por la producción de biodiesel y la venta de torta de palma de aceite, que se puede utilizar como alimento para el ganado.

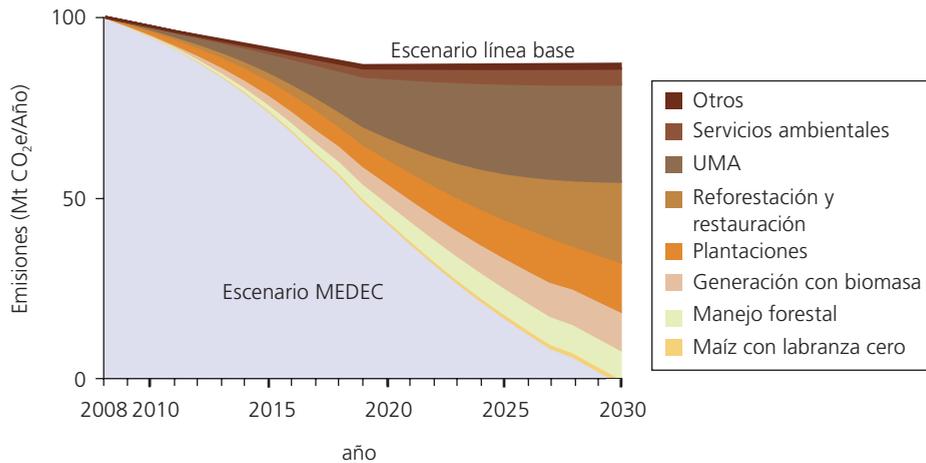
### Resumen

La implementación exitosa de todas las medidas del sector agrícola y forestal mitigaría aproximadamente 1.700 Mt CO<sub>2</sub>e entre 2008 y 2030. Las seis intervenciones de la estrategia REDD tienen en su conjunto un potencial de reducción de emisiones de 1.120 Mt CO<sub>2</sub>e, o dos tercios de las reducciones de las emisiones del sector. Otras intervenciones con un alto potencial de mitigación de la emisión de GEI son la reforestación y la restauración (10%), las plantaciones (9%) y el etanol de caña (9%). En conjunto estas nueve alternativas representan el 94% del potencial de mitigación del sector.

Las reducciones de las emisiones en uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS) de las 12 intervenciones de agricultura y bosques (63% en forma de emisiones reducidas y 37% en forma de captura de carbono) ascenderían a 927 Mt of CO<sub>2</sub>e, representando el 54% del impacto total de estas intervenciones. El restante 46% de las reducciones de emisiones tendría lugar en otros sectores, a través de la sustitución de combustibles fósiles por bioenergía en los sectores electricidad, industrial y transporte. El escenario MEDEC implica que las emisiones USCUSS en México serían negativas en el año 2030, es decir, México se convertiría en un sumidero neto en términos de USCUSS (gráfico 6.2).

Todas las intervenciones forestales tienen un gran potencial para reducir las emisiones de carbono. Sus costos de reducción van de un costo neto de \$18/t CO<sub>2</sub>e a un beneficio neto de \$20/t CO<sub>2</sub>e (cuadro 6.1). Por otro lado, los proyectos REDD y de reforestación tienen beneficios ambientales significativos, que no están incluidos en el análisis económico. Estos cobeneficios deben ser considerados y se abordan en el capítulo 7. En términos de inversión por tonelada de CO<sub>2</sub>e reducido, las intervenciones más eficientes son la producción de carbón vegetal (\$20/t) y maíz con labranza cero (\$15/t).

Se analizaron y evaluaron otras intervenciones en el sector agrícola y forestal, pero finalmente no se incluyeron en el escenario MEDEC, porque no cumplían con los criterios de dicho estudio, porque no había datos disponibles o por otras razones. El

**Gráfico 6.2** Emisiones de GEI en USCUS bajo el escenario MEDEC

Fuente: Autores.

- a. "Otros" incluye la producción de carbón vegetal y co-combustión con leña, que tienen un impacto pequeño en la reducción de las emisiones del sector USCUS. Obsérvese que numerosas intervenciones en el sector agrícola y forestal producen biomasa que sustituye el uso de combustibles fósiles en otros sectores, incluyendo electricidad (con biomasa), transporte (biocombustibles) y aplicaciones térmicas y, por ende, se muestran en los gráficos de emisiones de otros sectores.

metano proveniente de la producción de ganado, que se puede reducir usando biodigestores, es un componente importante de las emisiones de GEI. No obstante, había poca información disponible sobre biodigestores para granjas porcinas o bovinas, y su potencial de mitigación parecía relativamente bajo. Se consideraron varios cultivos para biocombustibles, pero solamente había datos apropiados para cuatro cultivos, los tres evaluados más arriba más la *jatropha*, para la producción de biodiesel. La *jatropha* no fue evaluada por sus elevados costos de mitigación. Finalmente, se consideraron varias tecnologías para generar electricidad a partir de la biomasa, incluyendo la gasificación en varias escalas. Se eligió finalmente una tecnología estándar de caldera y turbina de vapor, por razones económicas.

### Barreras a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero

Si bien el gobierno ha estado asignando mayores presupuestos y ha definido nuevos programas forestales en los últimos años, aún quedan barreras considerables a la implementación de las actividades de este subsector. Los programas de reforestación

Cuadro 6.1 Resumen de las intervenciones MEDEC en el sector agrícola y forestal

Intervención			Superficie (millones de hectá- reas)	Reducción anual máxima de emisiones (Mt CO <sub>2</sub> e/ año)	Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO <sub>2</sub> e)	
Sub- sector agrícola	Mejores prácticas	Maíz con labranza cero	2,5	2,2	15,3 (beneficio)	
		Producción de biocombustibles	Etanol de caña	1,5	16,8	11,3 (costo)
	Etanol de sorgo		3,2	5,1	5,3 (costo)	
	Biodiesel de palma		0,2	2,4	6,4 (costo)	
Subsec- tor forestal	REDD	Generación con biomasa	11,4	35,1	2,4 (beneficio)	
		Con uso productivo de la biomasa	Co-combustión con leña	0,6	2,4	7,3 (costo)
			Producción de carbón vegetal	9,0	22,6	19,6 (beneficio)
	Manejo forestal	9,0	7,8	12,7 (beneficio)		
	Sin uso productivo de la biomasa	Manejo de vida silvestre (UMA)	30,0	27,0	17,8 (costo)	
		Pago por servicios ambientales	5,0	4,4	18,1 (costo)	
	Reforestación / plantaciones	Reforestación y restauración	4,5	22,4	9,3 (costo)	
Plantaciones		1,6	13,8	8,4 (costo)		

Fuente: Autores.

y restauración podrían alcanzar un gran éxito con semillas seleccionadas y certificadas, plantas de semillero de mejor calidad, capacitación para los propietarios de las tierras y mejor selección de sitios. El manejo de los bosques nativos podría mejorarse enormemente a través de una supervisión más estrecha por parte de los servicios forestales; el control de la tala ilegal, incendios y pestes; y mejores prácticas de aclareo. La mayoría de estos temas podrían resolverse a través del desarrollo de capacidades en todos los niveles, incluyendo programas de capacitación sobre recolección de semillas y manejo de viveros y de bosques, que se encuentran entre las medidas más urgentes requeridas. Puesto que la mayor parte de los bosques en México están bajo alguna forma de propiedad comunitaria, la implementación de todas las intervenciones en el subsector forestal comprende el diseño de marcos institucionales adecuados para la participación de la comunidad.

La producción de carbón vegetal enfrentaría algunas barreras a la implementación, como la falta de un programa específico del gobierno, la resistencia cultural a la adopción de nuevas tecnologías de producción, la necesidad de capacitación y asistencia técnica para garantizar el uso y mantenimiento apropiados de la nueva tecnología, la falta de capital para invertir en hornos y equipo, y la escasez de constructores de hornos calificados y certificados.

El sistema de maíz de labranza cero se aplica en México, pero existen numerosas barreras para su implementación más amplia. La mayor parte de los agricultores no están familiarizados con este sistema; no existe un mercado bien desarrollado y una estructura de apoyo del mercado para los servicios agrícolas asociados, como aplicación de herbicidas y siembra directa; y va en sentido opuesto al uso tradicional del rastrojo de maíz como forraje para el ganado.

## Conclusiones

Las intervenciones forestales representan aproximadamente tres cuartos del potencial de mitigación en el sector agrícola y forestal, y son de las intervenciones que producen una mayor reducción de emisiones. El análisis no considera los beneficios ambientales (la conservación de la biodiversidad) asociados con el mantenimiento e incremento de la cubierta forestal. El éxito de la implementación de la mayoría de las intervenciones en el subsector forestal depende de los cambios que se realicen en el manejo forestal, el financiamiento público y el desarrollo de un mercado para los productos forestales sostenibles. Las consideraciones sobre cambio climático podrían proveer incentivos adicionales para los programas forestales en México. El costo estimado para alcanzar las medidas REDD mediante el pago de servicios ambientales es aproximadamente de \$18/t CO<sub>2</sub>e. En cambio, las intervenciones de manejo forestal para bioenergía u otros propósitos, que también producen beneficios REDD, tienen beneficios netos en vez de costos.

La bioenergía tiene un potencial significativo para reducir las emisiones de carbono a bajo costo. La intervención que tiene un menor costo en el sector agrícola y forestal es la producción de carbón vegetal, mientras que la mitigación anual más alta se alcanza con la generación de electricidad por biomasa.

Se evaluó que las intervenciones de biocombustibles líquidos, con la excepción del etanol de caña, tienen un potencial limitado para la reducción de emisiones sin interferir con la tierra destinada a cultivos para alimentos, bosques o áreas protegidas. (Hubo un supuesto explícito de no incluir tierras para biocombustibles que actualmente se utilizan para otros cultivos, para bosques o para conservación de ecosistemas; sin embargo, en la práctica es difícil controlar la conversión de la tierra si existen usos rentables para la misma.) Los costos de producción para la caña de azúcar en México se encuentran muy por encima de los niveles mundiales, requiriendo subsidios nacionales para los productores. Si los costos de producción no se reducen drásticamente, el etanol mexicano no será competitivo con el etanol producido en otros países.

Si se implementaran todas las intervenciones en el sector agrícola y forestal, el sector podría proveer un tercio del total nacional para reducir las emisiones en las próximas dos décadas. Aproximadamente dos tercios de esa reducción se podría alcanzar a costos netos inferiores a \$10/t CO<sub>2</sub>e.

# 7

## Un escenario de bajas emisiones para México

En este capítulo se presentan de manera conjunta los resultados de las intervenciones en los distintos sectores que fueron evaluadas en el estudio MEDEC, los cuales se utilizan como insumos para definir el escenario MEDEC de bajas emisiones para el 2030. Este capítulo también compara los costos (o beneficios) netos de las intervenciones de bajas emisiones en todos los sectores bajo la forma de una curva de costos marginales de abatimiento. El capítulo finaliza presentando los resultados de un modelo computarizado de equilibrio general dinámico para examinar el impacto potencial de las intervenciones del estudio MEDEC en la economía mexicana.

### La evolución de las emisiones en el escenario de la línea base

Para generar un escenario de bajas emisiones para México, es necesario en primer lugar evaluar qué sucedería en el caso de la línea base, sin tener en cuenta el cambio climático y suponiendo un precio efectivo del carbono igual a cero. Para este escenario, el estudio utilizó el modelo LEAP para contabilizar las emisiones generadas por las actividades de producción y consumo de energía.<sup>1</sup> Las emisiones de las actividades que no están asociadas a la energía, como los procesos industriales y el uso del suelo, fueron modeladas en forma separada.

El escenario de la línea base descansa en supuestos macroeconómicos que son compatibles con los del gobierno de México, incluyendo un crecimiento promedio anual del PIB del 3,6%,<sup>2</sup> un crecimiento promedio anual de la población del 0,6% y un

- 1 LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning*) es un modelo de planeación basado en el sistema Windows y diseñado para el análisis de abajo hacia arriba de políticas energéticas y ambientales. Fue desarrollado y patrocinado por el centro de EE.UU. del Stockholm Environment Institute (*ver* <http://www.energycommunity.org/>).
- 2 El gobierno mexicano modificó sus perspectivas de planeación para reflejar la actual crisis financiera. Considera ahora una tasa menor para el crecimiento del PIB hasta el 2017. Dada la naturaleza de largo plazo de MEDEC, el estudio continúa suponiendo la misma tasa promedio de crecimiento del PIB de largo plazo.

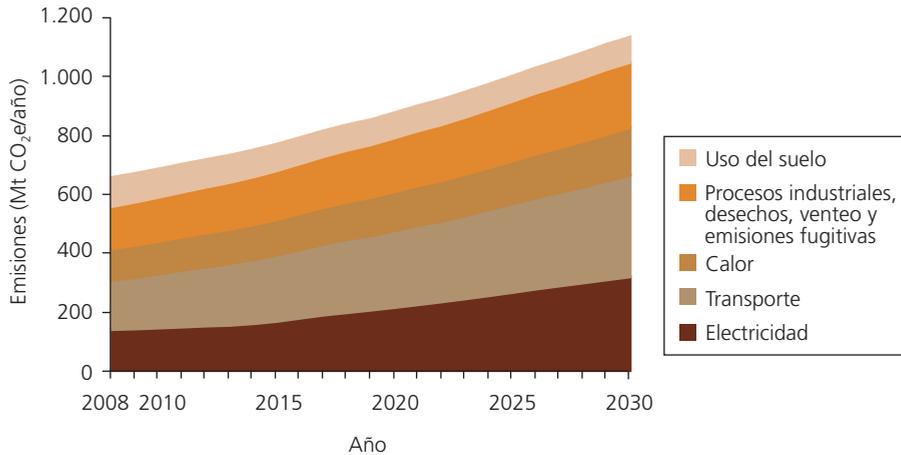
conjunto de precios de combustibles que corresponden a un precio del petróleo WTI (West Texas Intermediate) de aproximadamente \$53 el barril en 2009 y que aumentan levemente en términos reales durante el período de análisis hasta el 2030. El escenario de la línea base tiene en cuenta las tendencias históricas y el impacto de las políticas y programas de cada sector que ya se encuentran implementadas (cuadro 7.1).

**Cuadro 7.1** Supuestos e indicadores clave para el escenario de la línea base

Parámetro	2008	2030	Supuestos y tendencias
Población	106,7 M	120,9 M	Crecimiento anual de 0,6%
Urbanización	77%	85%	Proyecciones oficiales
PIB	\$0,734 billones	\$1,599 billones	Crecimiento anual de 3,6%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub>e</b>			
Electricidad	142 Mt (22%)	322 Mt (28%)	El actual crecimiento de la generación de electricidad está basado principalmente en gas natural importado; el escenario de la línea base contempla un incremento continuo de la generación, pero una desaceleración en la nueva capacidad basada en gas natural y un incremento en la contribución del carbón (en su mayor parte importado) en la mezcla de fuentes de energía del sector eléctrico
Uso final de energía para aplicaciones térmicas	107 Mt (16%)	160 Mt (14%)	Se prevé que el crecimiento del consumo de combustibles será inferior a las tasas de crecimiento del PIB en todos los sectores de uso final de energía, con excepción del sector transporte
Transporte	167 Mt (25%)	347 Mt (30%)	Crecimiento del parque vehicular y mayor uso de los vehículos debido al crecimiento de los ingresos, la expansión urbana descontrolada y la disponibilidad de automóviles de segunda mano baratos importados de los Estados Unidos
Uso del suelo	100 Mt (15%)	87 Mt (8%)	Se supone una disminución en la tasa de deforestación
Desechos y procesos industriales	143 Mt (22%)	221 Mt (19%)	Mayor consumo de materias primas y producción de desechos por el crecimiento continuo de los ingresos y la urbanización
Total	659 Mt	1.137 Mt	

Fuente: Autores.

Con base en estos supuestos, el escenario de la línea base estima que las emisiones totales de GEI en México crecerán de 559 Mt CO<sub>2</sub>e en 2008 a 1.137 Mt en 2030 (gráfico 7.1). Si bien este es un incremento considerable en las emisiones totales, refleja una reducción en la intensidad del PIB en términos de las emisiones de carbono de 0,98

**Gráfico 7.1** Emisiones de GEI en el escenario de la línea base, por fuente

Fuente: Autores.

kg CO<sub>2</sub>e a 0,74 kg CO<sub>2</sub>e por dólar. Sin embargo, las emisiones de carbono per cápita se incrementarían de 6,75 t CO<sub>2</sub>e a 9,84 t CO<sub>2</sub>e, reflejando en gran parte el efecto de los mayores ingresos sobre el consumo de energía y de materiales.<sup>3</sup>

La mayor parte del aumento en las emisiones de carbono en la línea base tiene lugar en dos sectores que ya son grandes contribuidores a ese tipo de emisiones: el sector transporte y el sector electricidad. La proyección de la participación del sector transporte en el total de emisiones indica que se incrementará del 21% en 2008 al 27% en 2030. Por su parte, las emisiones producidas por el sector eléctrico se estima crecerán del 18 al 24% de las emisiones totales. Se calcula asimismo que las emisiones de carbono generadas por el uso del suelo disminuirán en términos absolutos de 100 Mt a 87 Mt anuales, siguiendo la tendencia histórica en México de una reducción de las emisiones procedentes de las actividades de deforestación.

### La trayectoria alternativa de bajas emisiones del estudio MEDEC

El escenario alternativo del estudio MEDEC se construye sobre los mismos supuestos macroeconómicos que los de la línea base para el crecimiento del PIB, el crecimiento

3 En 2007 las intensidades del PIB en términos de las emisiones de carbono de los Estados Unidos y Japón fueron de 0,53 kg CO<sub>2</sub>e y 0,30 kg CO<sub>2</sub>e por dólar, respectivamente, mientras que las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub>e fueron 24 t CO<sub>2</sub>e y 11 t CO<sub>2</sub>e, respectivamente.

de la población y la tasa de urbanización. El objetivo central del escenario MEDEC es alcanzar un nivel similar de crecimiento económico con una huella de carbono significativamente menor. Ello se logra implementando intervenciones costo-efectivas de bajas emisiones a través de políticas e inversiones. En el escenario MEDEC se incluyen cuarenta intervenciones correspondientes a los cinco sectores (ver cuadro 1.1), que satisfacen todos los criterios definidos en la metodología de evaluación que se describe en el recuadro 1.1. El escenario MEDEC refleja las reducciones de las emisiones de carbono y las correspondientes implicaciones derivadas del hecho de implementar solamente estas 40 intervenciones.

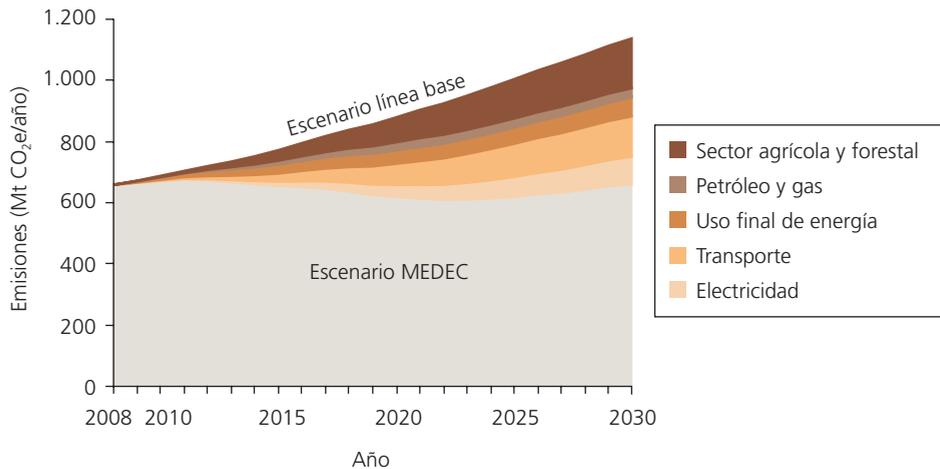
En el escenario MEDEC, se supone que se adoptan políticas para los distintos sectores que maximizan los beneficios de las intervenciones de bajas emisiones “ganar-ganar”; en este sentido, la mitigación de las emisiones de GEI se convierte en un objetivo explícito de política (cuadro 7.2). En el sector eléctrico, por ejemplo, se ejecutarían inversiones y políticas que promuevan alternativas de bajas emisiones como la cogeneración y la generación de electricidad a partir de energía eólica, geotérmica, de biomasa e hidráulica. En el sector petróleo y gas, el objetivo sería mejorar la eficiencia de las instalaciones de Pemex y reducir las emisiones fugitivas de gas natural en las instalaciones de distribución y almacenamiento. En los sectores de uso final de energía las inversiones y políticas buscarían principalmente acelerar y extender el alcance de las iniciativas en curso por parte del gobierno y del sector privado, basándose en los éxitos anteriores alcanzados. En el sector transporte, se implementarían inversiones y medidas de política para aumentar la participación del transporte público y de otras alternativas al uso de los vehículos privados en las zonas urbanas, para mejorar la eficiencia del parque automotor y para optimizar el transporte de carga. En el sector agrícola y forestal, la prioridad sería fortalecer los programas de reforestación y plantaciones, reducir la deforestación y degradación, y promover el uso de energía generada a partir de la biomasa sostenible.

La implementación de las intervenciones del estudio MEDEC estabilizarían las emisiones de GEI de México aproximadamente a los niveles alcanzados en 2008 durante el período hasta el 2030, lo que implicaría una reducción de las emisiones en aproximadamente 477 Mt CO<sub>2</sub>e respecto de la línea base (gráfico 7.2). En el escenario MEDEC, es posible que los ingresos en México crezcan firmemente al mismo tiempo que las emisiones de carbono se mantienen aproximadamente en el mismo nivel.<sup>4</sup>

---

4 La magnitud de la reducción de las emisiones de carbono en el escenario MEDEC de bajas emisiones no es altamente dependiente del supuesto que se hizo para la línea base sobre un incremento considerable en el consumo de carbón. Si el gas natural fuese el combustible primario incremental para la generación de electricidad en la línea base, la mayor parte de las intervenciones de bajas emisiones del estudio MEDEC en el sector eléctrico

**Gráfico 7.2** Reducción proyectada de emisiones por sector bajo el escenario MEDEC de bajas emisiones



Fuente: Autores.

Los tres sectores que actualmente emiten la mayor parte de las emisiones de GEI también tienen el mayor potencial para la reducción costo efectiva de dichas emisiones en el escenario MEDEC.<sup>5</sup> De la reducción total acumulada de emisiones de GEI, el 27% proviene del sector transporte, el 27% de la generación de electricidad y el 32% del sector agrícola y forestal. Las medidas para los sectores de consumo final de energía, que en gran parte resultan en una menor demanda de electricidad, representan

sustituirían el gas natural, con lo que se reduciría ligeramente el potencial de reducción de emisiones con respecto a lo que sucede cuando la línea base está dominada por el carbón. Dada la expectativa de que la generación de electricidad a base de gas natural (gran parte del mismo importado como gas natural licuado) sería más costosa que a base de carbón, el costo incremental para las intervenciones de bajas emisiones sería aún menor, lo que promovería la sustitución. Si la línea base fuese menos intensiva en el uso de carbón y las reducciones globales de las emisiones de carbono fuesen las mismas (450-500 Mt CO<sub>2</sub>e), el nivel total de las emisiones de GEI en el 2030 declinaría; las emisiones totales en la línea base podrían ser inferiores en 2030 respecto de 2008, pero las emisiones del escenario del estudio MEDEC serían esencialmente las mismas.

- 5 Los sectores que corresponden a los capítulos del presente informe no indican en qué sector tienen lugar las emisiones. Por ejemplo, varias intervenciones en los sectores de consumo final de energía reducen las emisiones de carbono en el sector eléctrico.

Cuadro 7.2 Resultados y cambios principales por sector bajo el escenario MEDEC

Sector	Reducción acumulada de emisiones de GEI 2008-2030 (Mt CO <sub>2</sub> e)	Reducción de emisiones alcanzada en 2030 (Mt CO <sub>2</sub> e/año)	Cambios principales en comparación con el escenario de la línea base
Electricidad	876 (17%)	91	Menor consumo de combustibles fósiles en la generación de electricidad mediante el incremento en el uso de tecnologías de bajas emisiones a partir de energías renovables
Petróleo y gas	435 (8%)	30	Reducción de las emisiones fugitivas en el sistema de transporte de gas natural; cogeneración en PEMEX, y rehabilitación de refinerías
Uso final de energía	857 (16 %)	63	Menor demanda de electricidad como resultado de un cumplimiento más estricto de las normas de eficiencia energética y de la aceleración de los programas dirigidos a reemplazar aparatos domésticos, lámparas y motores industriales ineficientes; menor demanda de combustibles mediante la ampliación del calentamiento solar de agua en viviendas y de la cogeneración en industrias; menores emisiones de CO <sub>2</sub> y de otros gases gracias a la mayor difusión de estufas mejoradas de leña
Transporte	1.422 (27%)	131	Menor demanda de combustibles fósiles resultante de promover un crecimiento urbano de mayor densidad, transporte masivo eficiente, transporte no motorizado, mayor eficiencia del parque automotor y mejor logística y mayor uso del transporte ferroviario para el movimiento de carga
Sector agrícola y forestal	1.706 (32%)	162	Programas de mayor escala para reducir la deforestación y degradación, reforestación y plantaciones, manejo forestal, y producción sostenible de energía de biomasa
Total	5.296 (100%)	477	Crecimiento económico estable sin aumentar la huella de carbono en México y con cobeneficios significativos

Fuente: Autores.

aproximadamente el 16% de la reducción de las emisiones. El sector gas y petróleo contribuye el restante 8% (cuadro 7.2).<sup>6</sup>

6 Con base en el programa *Methane to Markets* en el que México está participando, las emisiones fugitivas de metano en el sistema de transporte y distribución de gas natural pueden estar

## Los costos (o beneficios) netos de la reducción de las emisiones

Uno de los principales objetivos del estudio MEDEC es cuantificar los beneficios y costos de las opciones potenciales para mitigar las emisiones de GEI utilizando una metodología congruente. De esta manera, las intervenciones de los distintos sectores se pueden comparar con base en un sólido análisis económico (*ver* recuadro 1.1. y anexo B). El estudio MEDEC no es una evaluación exhaustiva de las posibles intervenciones de mitigación en México.<sup>7</sup> Otras intervenciones promisorias de bajas emisiones podrían someterse a un tipo similar de análisis para comparar su potencial de reducción de las emisiones, costos y requerimientos de inversión con las 40 intervenciones MEDEC.

El estudio utilizó un método de dos partes para determinar los costos (o beneficios) netos de las intervenciones de bajas emisiones. En el primer paso, el análisis está limitado a los costos y beneficios financieros y económicos mensurables –como el nivel de inversión nueva, inversiones evitadas, costos operativos y beneficios recurrentes como el valor de los ahorros en energía– para todas los actores involucrados relevantes. En un segundo paso, se identifican y evalúan las externalidades positivas o negativas. El método, similar al que se utiliza en una evaluación financiera y económica típica del Banco Mundial respecto de un proyecto de inversión, genera resultados como rentabilidad, generación de ingresos y una evaluación de las externalidades sociales y ambientales (tanto positivas como negativas).

El análisis cuantitativo de las externalidades ambientales desarrollado para el estudio MEDEC se limitó a los impactos sobre la salud asociados con la reducción de la contaminación del aire a nivel local (principalmente para el transporte, uso doméstico de combustibles y generación de electricidad). Puesto que no había datos comparables disponibles para la mayoría de las intervenciones, y dado que se evaluaron sólo las externalidades de la contaminación del aire, los resultados de las externalidades ambientales no se incluyen en la curva de costos marginales de abatimiento, sino en forma separada. Otros costos y beneficios que no fueron incluidos en el análisis económico de las intervenciones MEDEC comprenden los costos de transacción, como el costo político de aprobar e implementar nuevas leyes, y otros más tangibles pero también difícil de cuantificar, como la necesidad de informar a los consumidores, desarrollar instituciones públicas o privadas y formar nuevos negocios y mercados.

Muchas de las intervenciones con beneficios económicos netos positivos no se están implementando y muy probablemente seguirán sin implementarse hasta que

---

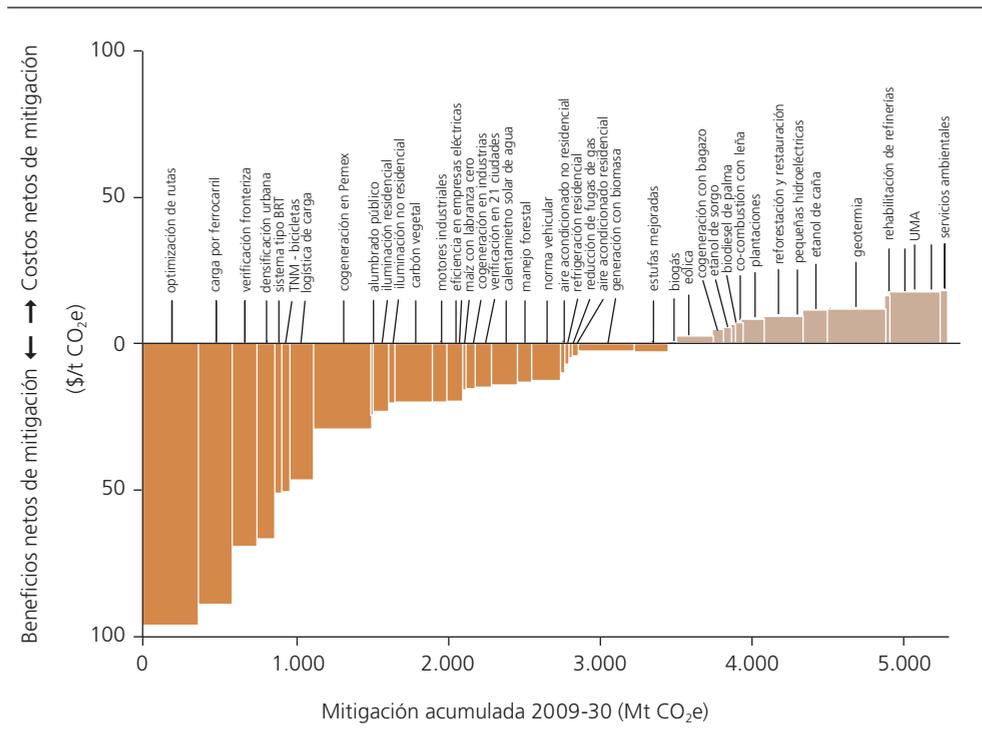
significativamente subestimadas. Si este es el caso, las emisiones del sector petróleo y gas en el escenario de la línea base –y el potencial para reducción– serían mucho más altas.

7 Entre las intervenciones de alta prioridad no evaluadas en el estudio MEDEC se encuentran las de manejo de residuos, como la recolección de gas de rellenos sanitarios y los programas urbanos de reciclado.

se superen las barreras clave. Algunas de las barreras importantes que impiden la ejecución de las intervenciones MEDEC se describieron en los capítulos de los distintos sectores (capítulos 2-6). En el capítulo 8 se abordan varias de las barreras más generales de políticas e inversiones. Se requiere realizar análisis más detallados para evaluar las barreras institucionales, de comportamiento y de otro tipo que impiden la implementación de las intervenciones de bajas emisiones y la forma en la que se puede superar dichas barreras.

Los resultados de la evaluación económica se resumen en la curva de costos marginales de abatimiento (gráfico 7.3). Las intervenciones en la parte superior de la curva tienen costos incrementales netos; las intervenciones en la parte inferior curva tienen beneficios incrementales netos. El área de cada barra representa el costo (o beneficio) neto total de una intervención MEDEC. Algunas barras son o muy angostas (pequeña disminución de emisiones, como el alumbrado público eficiente) o muy pequeñas (costos o beneficios unitarios netos bajos, como la generación de electricidad con biogás) para ser visibles.

Gráfico 7.3 Curva de costos marginales de abatimiento



Fuente: Autores.

Entre las intervenciones con el mayor potencial de mitigación se encuentran la generación de electricidad a partir de energía geotérmica (393 Mt CO<sub>2</sub>e), la cogeneración en Pemex (387 Mt), la generación de electricidad con biomasa (376 Mt), la optimización de rutas de transporte público (360 Mt), la energía eólica (240 Mt), las estufas o cocinas mejoradas de leña (222 Mt) y la norma vehicular de eficiencia (195 Mt). En conjunto estas siete intervenciones representan aproximadamente el 40% del potencial total de reducción de emisiones de todas las intervenciones MEDEC.

Las intervenciones con los mayores beneficios por cada tonelada de CO<sub>2</sub>e mitigada se representan en la parte izquierda de la curva de costos marginales de abatimiento. Las mismas incluyen la optimización de rutas de transporte público, la logística de carga por carretera, la carga por ferrocarril, la norma vehicular, la verificación vehicular fronteriza, la densificación urbana, la iluminación residencial, la cogeneración en Pemex, y la eficiencia en empresas eléctricas.

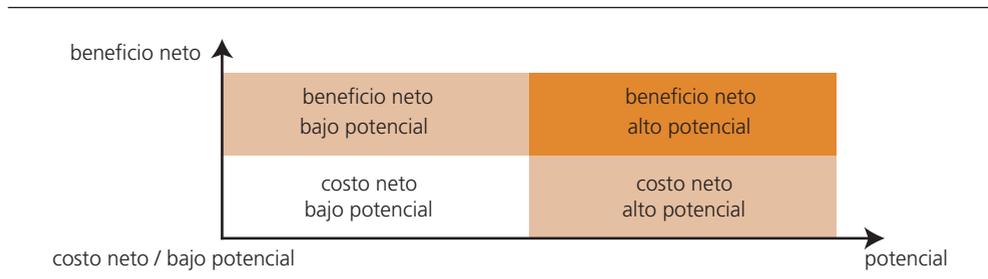
Veintiséis intervenciones tienen costos netos negativos (es decir, beneficios netos) y en su conjunto representan aproximadamente el 65% de todo el potencial de reducción de emisiones de las intervenciones analizadas. Treinta y cinco intervenciones (incluyendo las 26 intervenciones “ganar-ganar”) se podrían alcanzar a un costo de \$10/t CO<sub>2</sub>e o inferior. Todas juntas representan el 82% del potencial total de reducción de emisiones del escenario MEDEC.

Si se toma en cuenta tanto el criterio del potencial de reducción como el criterio del costo incremental neto, es posible hacer una primera priorización de las intervenciones de bajas emisiones (gráfico 7.4). En igualdad de circunstancias, el objetivo de un programa de bajas emisiones sería promover proyectos con un alto potencial de reducción de emisiones y con un beneficio neto económico.

### Impacto macroeconómico de las intervenciones del estudio MEDEC

El modelo macroeconómico desarrollado por Boyd e Ibarrarán (2008) se empleó para evaluar los impactos potenciales de implementar las intervenciones MEDEC en la

**Gráfico 7.4** Criterios para la selección de intervenciones de bajas emisiones



Fuente: Autores.

economía mexicana. Los resultados de las intervenciones (inversión, costos operativos y de otro tipo, y beneficios) fueron integrados en un modelo de equilibrio general computable (CGE) de la economía mexicana. Los resultados del escenario MEDEC de bajas emisiones fueron comparados en el modelo CGE con un escenario de línea base que utiliza la misma tasa de crecimiento y otras variables subyacentes. El análisis CGE permite realizar una evaluación del impacto de las intervenciones de bajas emisiones en el crecimiento económico, la distribución del ingreso, el nivel de bienestar económico, el nivel de ingresos del gobierno, la balanza comercial y la envergadura de la inversión y del capital en México entre 2008 y 2030.

Se encontró que el impacto económico global de implementar las intervenciones MEDEC sería un incremento del nivel general del PIB en un 5% en 2030. En el escenario MEDEC, el nivel de la inversión global en la economía aumenta considerablemente, como también el nivel final del capital social. En el modelo, las inversiones del gobierno y del sector privado se calculan de acuerdo con las intervenciones MEDEC y las funciones de producción del modelo se revisan con el tiempo a fin de reflejar el incremento general en la eficiencia del uso de energía. Los ingresos del gobierno crecen levemente en el escenario MEDEC, lo que indica que el efecto negativo de subsidiar varios programas de bajas emisiones está más que compensado por la mayor recaudación fiscal total generada por un incremento en el nivel del PIB. El incremento global del PIB no se distribuye en forma pareja: el sector agrícola y forestal es por mucho el gran ganador. El impacto sobre el nivel de bienestar es progresivo: el ingreso per cápita crece para todos los grupos de ingresos, acumulándose el máximo incremento en los deciles más bajos (cuadro 7.3).

**Cuadro 7.3** Efecto conjunto de las intervenciones MEDEC en la economía mexicana  
Cambio porcentual con respecto al escenario de línea base

Parámetro	2020	2030
PIB	2,06%	5,58%
Inversión total bajo el escenario MEDEC	7,04%	15,82%
Gasto gubernamental bajo el escenario MEDEC	-0,70%	1,35%
Capital social final en la economía	n.a.	7,55%
<b>Bienestar acumulado</b>		
Deciles 1-2	n.a.	3,19%
Deciles 3-5	n.a.	2,96%
Deciles 6-8	n.a.	1,87%
Deciles 9-10	n.a.	0,84%

Fuente: Autores.  
n.a.: no aplica.

# 8

## Elementos de un programa de desarrollo de bajas emisiones

Pareciera existir en México un potencial significativo para reducir las emisiones de GEI a un costo bastante bajo. Con base en el análisis, México podría mantener sus emisiones relativamente constantes durante las próximas dos décadas, a la vez que crece su economía de manera estable, si sigue una trayectoria de desarrollo de bajas emisiones.

Si bien el escenario MEDEC supone un programa audaz de políticas e inversiones de bajas emisiones, la magnitud de la reducción de emisiones alcanzada subestima las verdaderas reducciones de emisiones, debido a varios supuestos conservadores: solamente se consideran 40 de las numerosas intervenciones posibles, la línea base supone un rápido incremento en el uso de la energía producida con combustibles fósiles en el sector transporte y electricidad, y no se supone ninguna mejora importante en las tecnologías o reducciones en sus costos. Por otra parte, casi dos tercios de las intervenciones incluidas comprenden ahorros reales de costos en relación con la línea base, excluyendo las externalidades o costos de transacción.

### Áreas de alta prioridad

¿Cuáles son los sectores más prometedores para reducir las emisiones de carbono a un bajo costo? Las áreas de alta prioridad incluyen intervenciones en los sectores transporte, electricidad, forestal y eficiencia energética.

#### *Transporte*

Una proporción importante del potencial para la reducción de emisiones se encuentra en el subsector de autotransporte, el más grande y de mayor crecimiento de emisiones en México. El incremento de la participación del transporte público (así como del no motorizado) en las áreas urbanas y la mayor eficiencia energética del parque automotor (tanto para pasajeros como para carga) serán factores fundamentales para reducir las futuras emisiones en este subsector.

### *Electricidad*

Si se tiene en cuenta que México probablemente más que duplicará su capacidad total de generación de electricidad para el 2030, es importante que la capacidad nueva sea tan eficiente y de bajas emisiones como sea posible. Si se siguiera únicamente un criterio de mínimo costo basado en los costos internacionales, sería posible que por lo menos la mitad de la nueva capacidad instalada de generación de electricidad utilizase carbón bajo la línea base. México tiene un importante potencial de cogeneración en la industria (incluido el sector petróleo y gas) y fuentes renovables de energía (principalmente la energía eólica en Oaxaca), que en el curso de los próximos cinco años podrían comenzar a suministrar grandes volúmenes de electricidad a costos inferiores a los costos marginales actuales de México. En el mediano (5-10 años) a largo (más de 10 años) plazo, México podría desarrollar sus importantes recursos de energías renovables (hidráulica, eólica, geotérmica, solar), en muchos casos a bajo costo, que podrían formar parte de una estrategia de desarrollo energético de bajas emisiones.

### *Subsector forestal*

Si bien las emisiones relacionadas con la energía dominan el panorama actual y la trayectoria prevista en materia de emisiones de GEI, el subsector forestal es el que ofrece el mayor potencial de reducción de emisiones de estos gases durante las próximas décadas. Las intervenciones en este subsector por lo general tienen un costo más elevado que las del sector transporte o eficiencia energética (con base en \$/t CO<sub>2</sub>e), pero la mayoría de las intervenciones que combinan el beneficio de la reducción de la deforestación y la degradación forestales con el uso productivo de la biomasa, especialmente para fines energéticos, tienen beneficios netos.

### *Uso final de energía*

El presente estudio confirma las conclusiones de otros análisis que demuestran que el potencial para la mitigación de bajo costo en los sectores de uso final de energía en México es elevado en todos los sectores. Las medidas evaluadas para el estudio en estos sectores tienen las tasas de retorno financieras más altas de cualquier sector, así como tasas de retorno económicas elevadas, sin considerar los beneficios para la salud u otros cobeneficios, como la seguridad energética o el mayor nivel de competitividad.

## **“Factibilidad” y barreras a la implementación**

¿Qué significa que una intervención de bajas emisiones sea factible? Casi todas las intervenciones del estudio MEDEC incluidas en el escenario de bajas emisiones ya se

han implementado en México como proyectos regulares de inversión o programas piloto, demostrando así su factibilidad, por lo menos en una escala limitada. Para diversas intervenciones, lo que precisamente se necesita es la ampliación de un proyecto individual a un programa más amplio, lo que por lo general involucra cambios en las políticas, instituciones y comportamientos. Algunas intervenciones de bajas emisiones no cuentan con el marco regulatorio y los incentivos necesarios para su implementación en una mayor escala. Por ejemplo, la CFE y el sector privado han implementado unos pocos proyectos de energía eólica en Oaxaca (muchos de ellos para autoabastecimiento), pero las políticas generales requeridas para promover el suministro de energía eólica de proyectos privados a la red del servicio público aún no han madurado en México.<sup>1</sup>

Tan sólo porque una intervención tenga beneficios económicos netos positivos y sea factible no quiere decir que sucederá automáticamente. Los beneficios económicos netos positivos implican que los beneficios totales del proyecto para la sociedad son mayores que los costos; dice poco sobre quiénes son los ganadores y potenciales perdedores o si el proyecto tiene el apoyo político para ser aprobado e implementado. Tal como se resaltara en el análisis de cada sector, numerosas barreras –desde la inexperiencia y la falta de información entre los proveedores y consumidores hasta la incompatibilidad con las normas de la industria o las reglamentaciones del gobierno– impiden que las intervenciones de bajas emisiones sean implementadas en gran escala. Numerosas intervenciones que se han evaluado en el presente estudio enfrentan una variedad de barreras de mercado y no de mercado, como los altos costos de transacción asociados con los proyectos de pequeña escala o los problemas de “agente principal”, en los que el beneficiario y el inversor tienen intereses diferentes.

Dos de los desafíos más grandes que México y otros países deberán enfrentar para implementar un gran número de intervenciones de bajas emisiones del tipo evaluado en este estudio son el financiamiento de los a menudo mayores costos iniciales de las intervenciones de bajas emisiones y la instrumentación de políticas y programas favorables. Si bien una mayoría de las intervenciones tienen valores netos presentes positivos, numerosos proyectos de bajas emisiones requerirán una inversión inicial más alta en maquinaria y equipo. Las políticas para promover las intervenciones de bajas emisiones existen, pero se requerirán políticas nuevas o modificaciones en las actuales con el propósito de acelerar la implementación de dichas intervenciones.

Para la toma de decisiones tanto en el sector público como en el privado, los costos iniciales de inversión pueden constituir un impedimento importante para la implementación de las intervenciones. En muchos casos, las intervenciones de bajas

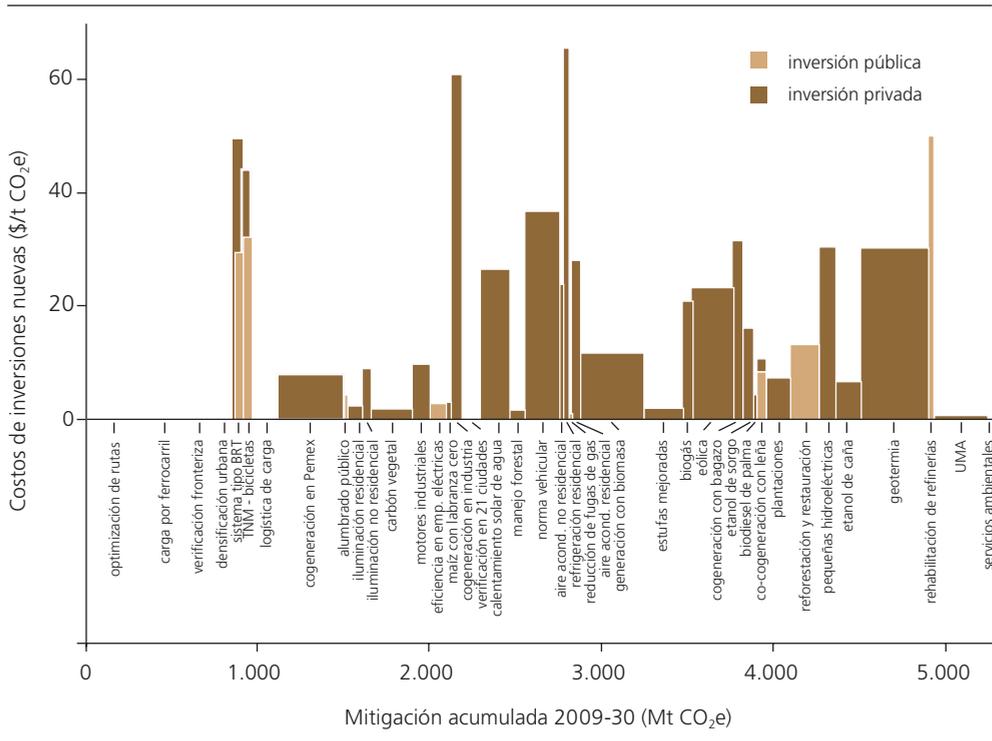
---

1 En algunos casos, los proyectos piloto iniciales fueron financiados en parte con recursos provenientes de donaciones, como las del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF).

emisiones como los proyectos de eficiencia energética y energías renovables tienen costos iniciales de inversión más altos que son compensados por los menores costos de combustible y operativos. Pero aún si los costos del ciclo de vida son menores, los costos iniciales más altos de la inversión a menudo impiden que dichas inversiones sean aprobadas e implementadas, especialmente donde los mercados de crédito no están bien desarrollados o las tasas de descuento implícitas son elevadas (es decir, el crédito es costoso). Por lo tanto, además del análisis financiero y económico, es importante evaluar los requerimientos de inversión para las intervenciones de bajas emisiones y para identificar el potencial de las fuentes de financiamiento para inversión.

La curva de costos marginales de abatimiento que se muestra en el gráfico 7.3 no indica el nivel de inversión requerida para cada inversión. Esos costos se presentan en el gráfico 8.1. Las intervenciones se presentan en el mismo orden de rango que la curva de costos marginales de abatimiento, desde el costo neto más bajo (beneficio neto más alto) al costo neto más alto. El ancho de cada barra mide el potencial total de reducción de emisiones; el área de cada barra representa la inversión total para esa intervención.

Gráfico 8.1 Curva de inversiones marginales de abatimiento



Fuente: Autores.

Estos resultados narran una historia muy diferente de la que narra la curva de costos marginales de abatimiento. Algunas intervenciones con grandes reducciones de emisiones y bajos costos netos tienen requerimientos de inversión muy grandes; otras intervenciones tienen requerimientos de inversión bajos o mínimos. No sorprende que los requerimientos de inversión de mayor magnitud corresponden a las intervenciones de gran escala e intensivas de capital, como los proyectos de energía renovable (geotérmica, eólica, electricidad con biomasa, hidráulica de pequeña escala y calentamiento solar de agua); eficiencia energética (cogeneración, eficiencia en la refinación y refrigeración residencial), y transporte (sistemas de transporte tipo BRT y norma vehicular).

Pero no todas las intervenciones de bajas emisiones tienen costos de inversión altos. Entre las intervenciones que no tienen costos de inversión muy altos están aquellas relacionadas con las mejoras en la eficiencia operativa u organizativa (optimización de rutas de transporte público, logística de carga por carretera); mejor utilización de la infraestructura existente (carga por ferrocarril),<sup>2</sup> o adopción de los programas de verificación vehicular.

En algunos casos, la barrera no son los costos financieros directos u obstáculos a la inversión sino más bien los costos de desarrollar, aprobar y hacer cumplir regulaciones nuevas, como las normas de eficiencia o normas operativas para los equipos nuevos y los existentes. Aun cuando todos los proveedores puedan estar sujetos a las normas nuevas, los fabricantes pueden oponerse a ellas, por el miedo de que dichas normas hagan subir los costos de producción, reduciendo las ventas. Divulgar información sobre los beneficios del programa –entre los productores y consumidores– serviría para vencer esa oposición.

Los programas de verificación vehicular son intervenciones que también tendrían costos de inversión bajos. Dichos programas pueden ser de utilidad para mantener fuera de las carreteras a los vehículos altamente contaminantes y que no están afinados, reduciendo los contaminantes locales y los GEI. Los costos del programa pueden ser cubiertos con las cuotas que se aplicarían a los propietarios de vehículos mediante inspecciones regulares.

La implementación de todas las intervenciones del estudio MEDEC en el período 2009-30 requeriría una inversión de \$64.500 millones, o aproximadamente \$3.000 millones por año (cuadro 8.1). Este nivel de inversión representa aproximadamente el 0,4% del actual PIB de México.

Además de las nuevas inversiones requeridas para las intervenciones del estudio MEDEC, algunas inversiones realizadas bajo la línea base se evitarían. Las inversiones

---

2 Los costos de inversión para esta intervención se supusieron igual a cero (lo que supone únicamente una mejor utilización de la infraestructura ferroviaria existente). En realidad, un incremento sustancial en el transporte de carga por ferrocarril involucraría costos de inversión en locomotoras, vagones y probablemente vías.

**Cuadro 8.1** Requerimientos de inversión del escenario MEDEC hasta el 2030  
\$ millones

Sector	Inversión nueva	Inversión evitada	Inversión neta
Electricidad	21.406	10.933	10.473
Petróleo y gas	4.637	1.482	3.155
Uso final de energía	15.771	9.898	5.873
Transporte	11.729	36.249	-24.520 <sup>a</sup>
Sector agrícola y forestal	10.928	3.699	7.229
Total	64.471	62.261	2.210

Fuente: Autores.

a. Una inversión neta negativa significa que la inversión nueva en el escenario MEDEC de bajas emisiones es inferior a la inversión evitada en el escenario de la línea base.

en nueva capacidad de generación de electricidad de bajas emisiones y la eficiencia energética (iluminación, aire acondicionado, refrigeración), por ejemplo, reemplazarían las inversiones en centrales eléctricas que utilizan gas natural o carbón. La inversión en autobuses y en infraestructura se reduciría (como resultado de la optimización de las rutas de transporte público), un gran número de autobuses se reemplazarían por grandes autobuses articulados del sistema de transporte tipo BRT, y caería el requerimiento de camiones e infraestructura para carga (como resultado de la optimización de la logística del transporte de carga por carretera). Se estima que, en conjunto, el valor de las inversiones evitadas en transporte asociadas con las intervenciones del estudio MEDEC sería más del triple del valor de las nuevas inversiones, resultando en una inversión neta negativa global bajo el escenario MEDEC de transporte. (Dado que muchas de las inversiones evitadas corresponden a diferentes actores, no tiene sentido desde la perspectiva de un proyecto sustraer las inversiones evitadas de las nuevas inversiones. No obstante, los números “netos” de inversión que se presentan en el cuadro 8.1 sí reflejan los requerimientos de inversión para México en su conjunto.)

### Financiamiento de las intervenciones de bajas emisiones

La inversión en el desarrollo de bajas emisiones no necesita provenir del gobierno (gráfico 8.1). Aún bajo las actuales prácticas presupuestarias, la vasta mayoría de las intervenciones –incluyendo la mayoría de las inversiones en eficiencia energética– serían financiadas por el sector privado y las familias (cuadro 8.2).

El apoyo gubernamental es importante para muchas inversiones en infraestructura pública, y es posible y recomendable diseñar programas de subsidios gubernamentales para introducir y acelerar la adopción de algunas intervenciones de bajas emisiones.

**Cuadro 8.2** Intervenciones de bajas emisiones según fuente de financiamiento

Sector privado	Familia	Sector público <sup>a</sup>
Eficiencia energética comercial	Eficiencia energética residencial	Alumbrado público
Eficiencia energética industrial	Calentamiento solar de agua	Eficiencia en servicios públicos
Cogeneración en industrias, incluyendo ingenios azucareros	Maíz con labranza cero	Reforestación y restauración
Producción independiente de energía a partir de fuentes renovables (eólica, biomasa, etc.)	Vehículos nuevos	Infraestructura de transporte
Autobuses	Verificación vehicular	Geotermia
Biocombustibles líquidos		Inversiones en petróleo y gas

Fuente: Autores.

- a. En el mundo, numerosas inversiones en el sector público se financian a través de esquemas de concesión con contratistas u operadores privados, para la generación de electricidad, petróleo y gas, transporte público, otros servicios públicos (suministro de agua y saneamiento), etc.

También es posible pasar al sector privado la responsabilidad de más inversiones destinadas a servicios e infraestructura que tradicionalmente han sido públicos, como el transporte urbano o el sector energético, mediante concesiones públicas u otro tipo de asociaciones público-privadas. Entre las áreas específicas en las que el sector privado podría ser más activo con modificaciones en las políticas regulatorias, se encuentran la eficiencia energética en el sector público y el aprovechamiento de energías renovables. Por otra parte, al mejorar la eficiencia del financiamiento público –especialmente en los sectores petróleo y electricidad en México– se pueden reducir los costos y riesgos para el gobierno.

México es el único país entre los países de ingresos medios en el que la industria energética –incluyendo el nivel de distribución minorista– está prácticamente en manos de tres grandes empresas estatales: Pemex, CFE y LyFC. El papel de las inversiones de los sectores público y privado será particularmente importante en México en el sector energético, considerando el dominio de las empresas estatales y las limitaciones (incluidas aquellas establecidas en la Constitución) a la inversión privada. México puede proveer un entorno propicio para la inversión en el sector energético sin ser el mismo gobierno el principal inversor. Tal como lo han demostrado algunas empresas estatales de petróleo y electricidad en otros países, hacerlo de esta forma no significa necesariamente sacrificar la soberanía nacional sobre la propiedad de los recursos naturales estratégicos. Lo que se necesita para atraer inversiones hacia los sectores eléctrico y gas y petróleo son entornos estables con reglas claras que permitan la contratación de acuerdo con las mejores prácticas internacionales. Hay un margen considerable para mejorar la eficiencia operativa y de inversión de la industria estatal

energética en México, y la preocupación sobre el cambio climático puede ejercer una influencia adicional para que se realicen esas mejoras.

A pesar de la reciente agitación que tuvo lugar en los mercados financieros internacionales, México seguirá siendo un país atractivo para la inversión del sector privado en el área energética y habrá probablemente mayor atención en todo el mundo respecto de las oportunidades para energías renovables, eficiencia energética y transporte sostenible. Existe así un margen considerable para involucrar al sector privado en estos sectores en México. Las reformas que recientemente adoptara el gobierno destinadas a mejorar la eficiencia del sector energético estatal son un paso positivo. El sorprendente incremento en la cantidad de productores independientes de energía en México desde mediados de la década de 1990 pone de manifiesto el potencial para la participación del sector privado (aún si el modelo elegido ha implicado un mayor riesgo y un costo más elevado para el sector público de lo que es característico en el mundo entero.)

Otra área en la cual la inversión gubernamental es importante es el área de investigación y desarrollo de tecnologías e intervenciones de bajas emisiones. En muchas áreas, México puede obtener ventaja de los adelantos tecnológicos alcanzados en otros países que servirán para disminuir las emisiones de GEI, incluyendo las tecnologías actualmente bajo análisis, como la captura y almacenamiento del carbono, y las tecnologías que aún hay que desarrollar. En otros ámbitos, como los aerogeneradores de gran escala, México tiene una ventaja comparativa, y el gobierno debería asistir en la promoción de la investigación y el desarrollo industrial en dichas áreas. Las áreas de investigación que son más importantes para México que para otros países –como el desarrollo de normas de eficiencia energética para edificios residenciales en climas cálidos y secos– también merecen un esfuerzo particular.

## Políticas para el desarrollo de bajas emisiones

Muchas de las intervenciones de alta prioridad del estudio MEDEC requerirán cambios en las políticas antes de que puedan implementarse en gran escala (recuadro 8.1). Algunas barreras normativas se pueden eliminar o reducir mediante reglamentaciones nuevas específicas dirigidas a una clase de intervenciones, como legislación sobre energías renovables; otras barreras, como el impacto de los precios bajos de la energía en las inversiones de eficiencia energética, cubren todo el ámbito de la economía. Algunas intervenciones de bajas emisiones –como aquéllas en el transporte urbano– requerirán una mayor coordinación entre las múltiples instituciones gubernamentales y entre los diferentes niveles de gobierno. Numerosas intervenciones requieren una planeación de más largo plazo por parte del gobierno y una mayor continuidad trans-sexenal en el gobierno federal y en los gobiernos de los estados.

Muchas políticas recomendadas –como los contratos con productores independientes de energía o con ESCO– no son nuevas en México; se podrían mejorar y ampliar

### Recuadro 8.1 Políticas de apoyo al desarrollo de bajas emisiones

Una amplia variedad de políticas podrían sustentar el desarrollo de bajas emisiones en México. Siete de esas políticas se describen a continuación.

- *Generación de electricidad a partir de energías renovables.* Las políticas de promoción como los contratos y tarifas predefinidos (“tarifas *feed-in*”) que permiten y activamente alientan a los generadores de pequeña escala a producir y vender electricidad a la red, gracias a que reducen los riesgos del desarrollo de proyectos, aumentarían el suministro de electricidad, en gran parte a costos inferiores a los que actualmente paga CFE. Un primer paso útil sería definir los modelos de contrato para pequeños generadores.
- *Normas de eficiencia energética.* La definición o mejora de las normas existentes sobre eficiencia energética para equipos de amplio uso (motores, bombas, lámparas, calderas, hornos, etc.); aparatos electrodomésticos (acondicionadores de aire, refrigeradores), y vehículos (automóviles, camiones, autobuses) reduciría el consumo de energía por equipo o vehículo. Las normas necesitan ser complementadas con medidas que garanticen la eficiencia energética de los vehículos y equipos usados, tales como los programas de verificación vehicular y los pagos en efectivo por la *chatarización* o desguace de vehículos y aparatos electrodomésticos.<sup>a</sup>
- *Precios de la energía.* En vista de la naturaleza regresiva de los subsidios energéticos en México, la reducción de los subsidios implícitos para los consumidores residenciales de electricidad de medianos y altos ingresos tendría un impacto inmediato en la reducción del consumo de electricidad en México, al mismo tiempo que mejoraría el efecto distributivo de los precios de la energía (ver recuadro 4.2). El incremento de los precios de la gasolina, que se han mantenido estables o han bajado en los últimos 20 años, tendría un efecto directo sobre el uso de automóviles privados, un segmento que ha contribuido de manera importante al aumento de las emisiones de GEI en México durante los últimos 25 años.
- *Cambios en las reglas para las adquisiciones públicas.* La eficiencia energética en numerosas instalaciones públicas (escuelas, hospitales, edificios gubernamentales, instalaciones de suministro de agua y de saneamiento, etc.) está limitada por la incapacidad de los organismos públicos de celebrar contratos con empresas privadas de eficiencia energética por un plazo superior a un año. La revisión de las normas para adquisiciones públicas serviría para que las instituciones públicas ahorren energía y reduzcan sus costos operativos.
- *Planeamiento urbano y transporte público.* Se requieren reglamentaciones complementarias y acciones coordinadas por parte de los organismos de los gobiernos federal, estatales y municipales para promover modelos de planeación urbana que reduzcan la demanda de transporte (zonas de alta densidad, corredores radiales, etc.) y ofrezcan una infraestructura de transporte público cómodo, accesible y seguro, incluyendo áreas para los peatones y las bicicletas.

a En el caso de los refrigeradores, la experiencia internacional muestra que cuando la gente compra un refrigerador nuevo y el refrigerador viejo no es tomado como parte de pago o eliminado, puede terminar como un segundo refrigerador en la misma vivienda o transferido a otra vivienda, resultando así en un incremento en el uso de electricidad para refrigeración y anulando las potenciales mejoras de eficiencia del nuevo equipo.

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación recuadro 8.1)

- *Programas forestales.* Las políticas para el manejo y la protección de los bosques nativos –como aquéllas para el control de la tala ilegal, la prevención de incendios y el control de plagas– rendirán beneficios ambientales a nivel local y global. Otro ejemplo de medida para reducir la deforestación y promover los programas de reforestación y plantaciones es el programa para el manejo forestal comunitario.
- *Normas de calidad del aire.* Las mejores normas de calidad de combustibles y el mejor cumplimiento de las normas de calidad del aire podrían tener como resultado una reducción de GEI osto efectiva. Las mejoras en la calidad de los combustibles –principalmente de la gasolina, el diesel y el combustóleo– servirían para que México cumpla con las normas de calidad del aire ambiente y, al permitir un mejor desempeño de los motores, podrían reducirse las emisiones de GEI. Los programas de verificación vehicular sirven para mantener fuera de las calles a los vehículos que no están afinados, mejorando la calidad del aire local y elevando la eficiencia de los vehículos. La ampliación del sistema de transporte público reduciría el consumo de combustibles por persona. Ambas medidas contribuirían a mejorar la calidad del aire en aquellas áreas de México que actualmente no cumplen con las normas ambientales.

para promover el desarrollo de bajas emisiones a través de la eficiencia energética y las energías renovables (lo que también acarrearía beneficios de diversificación de fuentes de energía y protección del medio ambiente). Entre los problemas que se plantean respecto de los proyectos de energías renovables han estado los bajos precios de planeación que CFE supone para el gas natural, la falta de un reconocimiento adecuado de la capacidad de las energías renovables intermitentes y la incapacidad para ajustar los procedimientos de adquisiciones a los requerimientos de los proyectos de energías renovables. Si se definen de manera previa las condiciones de los contratos de compra de electricidad de pequeña escala se promoverían las ventas de electricidad a la red de parte de productores de energía con energías renovables intermitentes o de pequeña escala o con cogeneración. Los cambios legales recientemente adoptados han eliminado algunas de las barreras a la explotación del potencial de cogeneración de Pemex –que representa más del 6% de la capacidad total instalada en México– pero aún es necesario establecer un marco regulatorio que permita que estos proyectos ofrezcan a la red energía y capacidad a gran escala y con los incentivos adecuados.

### La importancia de los cobeneficios

Las externalidades positivas (cobeneficios) pueden ser muy relevantes para ciertos tipos de medidas de mitigación; su inclusión puede servir para justificar las intervenciones de bajas emisiones. El hecho de que las externalidades positivas no se hayan incluido en el análisis económico comparativo que se presenta en el capítulo 7 significa que los proyectos que reducen el consumo de combustibles fósiles o protegen los bosques

tendrían retornos económicos netos aún más altos si se incluyen los beneficios para la salud o ecológicos.<sup>3</sup>

Las intervenciones del sector transporte que reducen la intensidad del transporte o mejoran la eficiencia de los vehículos pueden tener impactos significativos positivos en las enfermedades respiratorias agudas y el asma. La implementación de los programas de verificación vehicular a nivel nacional resultaría en grandes ahorros de energía para los propietarios de los vehículos y serviría para satisfacer las normas de calidad del aire de México. Esta es un área de particular importancia para México si se toman en cuenta las grandes cantidades de vehículos usados que ingresan al país cada año procedentes de Estados Unidos.<sup>4</sup> Los proyectos forestales –incluyendo la deforestación evitada y la reforestación– pueden generar grandes beneficios ambientales en términos de la conservación del suelo, la calidad del agua y la preservación de los ecosistemas (externalidades que no se estimaron en el estudio MEDEC), además de proveer empleo e ingresos para las comunidades rurales.

La contaminación del aire en la Ciudad de México es un ejemplo de una externalidad negativa que ha llamado considerablemente la atención de la población y que ha tenido como resultado una respuesta política importante. Durante los años 90, el gobierno de la Ciudad puso en marcha varias medidas para reducir la contaminación. Estas medidas redujeron la cantidad de días por año en que las normas de calidad del aire se infringen. Las intervenciones de mitigación del cambio climático descritas en el presente informe redundan en la reducción de la contaminación del aire como un cobeneficio (el objetivo principal es reducir el consumo global de energía y las emisiones de GEI). Numerosos proyectos que actualmente se están promoviendo como proyectos de “cambio climático” previamente habían sido apoyados por su contribución a la seguridad energética (energías renovables y eficiencia energética) o por los beneficios locales para la salud y el medio ambiente (reforestación y transporte urbano).

Al igual que en otras partes del mundo, los cobeneficios en México por lo general no se incluyen en el análisis costo-beneficio y están subvaluados en el proceso público de toma de decisiones. Es de esperarse que la internalización de dichos beneficios y costos –mediante cargos por contaminación del aire o pagos por servicios ambientales, por ejemplo– conduzca a resultados más eficientes.

- 3 Para ejemplos de beneficios para la salud procedentes del sector transporte y de intervenciones de estufas mejoradas, ver recuadros 4.1 y 6.1.
- 4 El flujo de vehículos más antiguos y más contaminantes en los estados de México que tienen un cumplimiento laxo de las normas ambientales y programas deficientes de verificación vehicular constituye probablemente un ejemplo en el cual el libre comercio y las normas ambientales diferenciales pueden empeorar la calidad del ambiente en el país receptor.

## Acciones de corto plazo

A medida que el gobierno de México avance con su programa de mitigación del cambio climático, es importante que priorice las intervenciones de corto plazo. El presente estudio recomienda que se dé prioridad a las intervenciones con las siguientes características:

- Importante potencial para la reducción de las emisiones de carbono.
- Tasas de retorno económicas positivas incluyendo los grandes cobeneficios.
- Demostración exitosa a escala comercial en México o a nivel internacional.
- Bajos costos de inversión y capacidad de obtener financiamiento.

Una consideración adicional, en vista de la crisis financiera internacional de 2008-9, es que las intervenciones de bajas emisiones deben tener efectos positivos de empleo y de desarrollo secundario. La evidencia inicial sugiere que las inversiones que contribuyen a mejorar el capital social tienen el mayor impacto en el empleo (aunque es necesario realizar investigaciones adicionales en este tema).<sup>5</sup>

Las intervenciones del estudio MEDEC estuvieron limitadas a las tecnologías comerciales existentes, por lo que todas están disponibles hoy. Todas las intervenciones de eficiencia energética, más las que involucran mejoras en la eficiencia del sector energético (cogeneración, eficiencia de las empresas eléctricas) están técnicamente disponibles, y todas cuentan con importantes casos demostrativos comerciales en México. Algunas tecnologías –como la generación de electricidad con biomasa– han sido demostradas a gran escala en el exterior pero no en México, por lo que pueden necesitar varios años de desarrollo de mercados para echarse a andar de manera autónoma. Los beneficios de las intervenciones que involucran cambios en la infraestructura urbana –calles, edificios, viviendas, infraestructura peatonal, etc.– necesitarán tiempo para madurar, pero todas podrían comenzar en forma inmediata. Puesto que la mayoría de las intervenciones que se evaluaron tienen costos inferiores a \$10/t CO<sub>2</sub>e (y ninguna cuesta más de \$25/t CO<sub>2</sub>e), casi todas son económicamente factibles hoy o lo serían en el futuro cercano, suponiendo el desarrollo de un mercado internacional del carbono con una cobertura amplia en el que México pueda participar.<sup>6</sup>

Un criterio final importante para la implementación en el corto plazo es que se puedan vencer las barreras legales, regulatorias e institucionales a la implementación.

- 5 El modelaje macroeconómico que se realizó por medio del modelo de equilibrio general computable (CGE) de México da evidencia de una correlación positiva entre el escenario de bajas emisiones y el empleo. El desempleo fue más bajo en los escenarios que resultaron con el mayor incremento en capital social nuevo.
- 6 Más de cuatro quintos del potencial de reducción de emisiones de las intervenciones MEDEC tienen un costo inferior a US\$10/tCO<sub>2</sub>e, sin considerar las externalidades positivas.

La prueba decisiva para las intervenciones del estudio MEDEC es que ya se han implementado exitosamente en México o en el exterior. La mayor parte de las intervenciones del estudio MEDEC cumplen con estos criterios. Las barreras institucionales, como las discutidas en relación con el sector energético, permanecen y continuarán inhibiendo las inversiones y las mejoras en la eficiencia, pero todas se podrían vencer con cambios moderados en el marco regulatorio.

Varias intervenciones de bajas emisiones que cumplen con los criterios de potencial, costo y factibilidad se podrían implementar en el corto a mediano plazo (uno a cinco años). Algunas de estas intervenciones, como los sistemas de transporte tipo BRT, ya se están implementando a mayor escala. Con base en los proyectos implementados en la Ciudad de México y en otras partes en Latinoamérica, nuevos sistemas BRT se están poniendo en marcha en otras rutas de la Ciudad de México, así como en otras grandes ciudades en México. Otros ejemplos de proyectos que se podrían ejecutar en mayor escala en el corto plazo son los programas de iluminación residencial, como los desarrollados bajo los programas de FIDE, las granjas eólicas en Oaxaca con base en los programas piloto de CFE, el manejo forestal sostenible basado en el proyecto de Los Tuxtlas en Veracruz, la cogeneración en las refinerías de Pemex con base en el proyecto de la Refinería Nuevo Pemex, y las normas de eficiencia para vehículos nuevos, que se complementan con programas de verificación para vehículos usados (cuadro 8.3).

### Apoyo internacional

Varios mecanismos internacionales podrían apoyar el programa de desarrollo de bajas emisiones de México. Un acuerdo internacional que establezca límites de emisiones de carbono para los países industrializados y que amplíe los mecanismos de mercado de bonos de carbono constituye el ingrediente necesario para mantener la venta de créditos de carbono por parte de los países en desarrollo. El impulso político internacional para adoptar acciones de mitigación del cambio climático ha venido creciendo en los últimos años y se han creado las condiciones para un nuevo acuerdo que dé un mayor impulso a las acciones para reducir las emisiones de GEI por parte de los países industrializados y los países en desarrollo, y que permita que los países en desarrollo de beneficien más de los mercados del carbono.

Teniendo como base la experiencia adquirida a través de proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio –tanto positiva como negativa–, es probable que el mercado privado del carbono continúe concentrándose en los proyectos que sean relativamente fáciles de financiar. Estos proyectos comprenderán aquéllos para reducir las emisiones de metano, en particular en rellenos sanitarios y en granjas. Es probable que también incluyan proyectos de pequeña escala cuya reducción de emisiones sea relativamente fácil de verificar y controlar (como las intervenciones en el sector energético que uti-

Cuadro 8.3 Intervenciones de corto plazo

<i>Intervención</i>	<i>Inversión nueva total (\$ millones)</i>	<i>Reducción total de emisiones (Mt CO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Reducción anual máxima de emisiones (Mt CO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Costo o beneficio de mitigación (\$/t CO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Plazo de implementación</i>
Eficiencia en empresas eléctricas	286	103	6	19 (beneficio)	Corto plazo
Energía eólica	5.549	240	23	3 (costo)	Corto/mediano plazo
Cogeneración en Pemex	3.068	387	27	29 (beneficio)	Corto/mediano plazo
Calentamiento solar del agua	4.464	169	19	14 (benefit)	Corto/mediano plazo
Iluminación residencial	237	100	6	23 (beneficio)	Corto plazo
Iluminación en edificios no residenciales	420	47	5	20 (beneficio)	Corto plazo
Estufas mejoradas de leña	434	222	19	2 (beneficio)	Corto plazo
Verificación vehicular fronteriza	0	166	11	69 (beneficio)	Corto plazo
Sistemas de transporte tipo BRT	2.332	47	4	51 (beneficio)	Corto plazo
Verificación vehicular en 21 grandes ciudades	0	109	11	15 (beneficio)	Corto plazo
Manejo forestal	148	92	8	13 (beneficio)	Corto plazo
Optimización de rutas de transporte público	0	360	32	97 (beneficio)	Corto/mediano plazo
Transporte no motorizado	2.252	51	6	50 (beneficio)	Corto/mediano plazo
Logística de carga por carretera	0	157	14	46 (beneficio)	Corto/mediano plazo
Norma vehicular	7.145	195	20	12 (beneficio)	Corto/mediano plazo
Plantaciones	1.084	153	14	8 (costo)	Corto/mediano plazo
Reforestación y restauración	2.229	169	22	9 (costo)	Corto/mediano plazo
<b>Total</b>	<b>29.648</b>	<b>2.768</b>	<b>247</b>		

Fuente: Autores.

lizan una tecnología específica). Sería útil revisar las normas que rigen el Mecanismo de Desarrollo Limpio o el mecanismo que eventualmente lo sustituya, para permitir mayor flexibilidad para promover proyectos de mitigación en los países en desarrollo, incluyendo una transición hacia enfoques dirigidos a políticas y programas.

Los programas para sustentar la mitigación del cambio climático apoyados por organizaciones bilaterales y multilaterales, incluyendo aquéllas bajo la CMNUCC, procurarán ampliar el actual ámbito de las acciones de mitigación para incluir áreas que no han sido el pilar del mercado privado del carbono. Existe la necesidad, por ejemplo, de ampliar el alcance de los mercados del carbono para incluir más proyectos de uso del suelo, fuente importante de reducción de emisiones. Dichos proyectos tienen costos financieros relativamente moderados y se podrían beneficiar con el apoyo político que los ingresos por bonos de carbono podrían proveer.

Otra área que no ha sido suficientemente apoyada por el mercado del carbono, y que es de alta prioridad para México y otros países de ingresos medios, es el autotransporte. El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y nuevas iniciativas como el *Clean Investment Fund* están cada vez más interesadas en la mitigación de las emisiones de GEI en áreas como los programas de transporte Sostenible y otros programas que no han visto gran participación por parte de los mercados privados del carbono ni de los programas públicos de mitigación. El estudio MEDEC ofrece mayores evidencias sobre las intervenciones de alta prioridad en el sector transporte. Con base en los resultados de este estudio, México ha presentado una propuesta para aprovechar el financiamiento del *Clean Investment Fund* para proyectos de transporte sostenible, eficiencia energética y energías renovables.



## APÉNDICE A

### RESUMEN DE LAS INTERVENCIONES DEL ESCENARIO MEDEC

*Cuadro A1 Inversión, reducción de emisiones y costo neto de mitigación de las intervenciones MEDEC*

<i>Intervención</i>	<i>Sector</i>	<i>Inversión nueva (millones de dólares)</i>	<i>Reducción total de emisiones (MtCO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Reducción anual máxima de emisiones (MtCO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO<sub>2</sub>e)</i>
Optimización de rutas	Transporte	*	-360	-31,5	-97
Carga por ferrocarril	Transporte	0	-220	-19,2	-89
Verificación fronteriza	Transporte	0	-166	-11,2	-69
Densificación urbana	Transporte	*	-117	-14,3	-66
Sistemas tipo BRT	Transporte	2.333	-47	-4,2	-51
TNM – bicicletas	Transporte	2.252	-51	-5,8	-50
Logística de carga	Transporte	0	-157	-13,8	-46
Cogeneración en Pemex	Petróleo y gas	3.068	-387	-26,7	-29
Alumbrado público	Eficiencia energética	39	-9	-0,9	-24
Iluminación residencial	Eficiencia energética	237	-100	-5,7	-23
Iluminación no residencial	Eficiencia energética	420	-47	-4,7	-20
Carbón vegetal	Agrícola y forestal	416	-248	-22,6	-20
Eficiencia en empresas eléctricas	Eléctrico	286	-103	-6,2	-19
Motores industriales	Eficiencia energética	907	-94	-6,0	-19
Cogeneración en industrias	Eficiencia energética	3.738	-61	-6,5	-15
Maíz con labranza cero	Agrícola y forestal	74	-25	-2,2	-15
Calentamiento solar de agua	Eficiencia energética	4.464	-169	-18,9	-14
Verificación en 21 ciudades	Transporte	0	-109	-10,6	-14
Manejo forestal	Agrícola y forestal	148	-92	-7,8	-13
Norma vehicular	Transporte	7.145	-195	-20,1	-12
Aire acondicionado no residencial	Eficiencia energética	589	-25	-1,7	-10
Refrigeración residencial	Eficiencia energética	1.907	-29	-3,3	-7
Aire acondicionado residencial	Eficiencia energética	1.174	-42	-2,6	-4
Reducción de fugas de gas	Petróleo y gas	16	-17	-0,8	-4
Generación con biomasa	Agrícola y forestal	4.254	-376	-35,1	-2
Estufas mejoradas	Eficiencia energética	434	-222	-19,4	-2
Biogás	Eléctrico	1.141	-55	-5,4	1

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación cuadro A1)

<i>Intervención</i>	<i>Sector</i>	<i>Inversión nueva (millones de dólares)</i>	<i>Reducción total de emisiones (MtCO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Reducción anual máxima de emisiones (MtCO<sub>2</sub>e)</i>	<i>Costo o beneficio neto de mitigación (\$/t CO<sub>2</sub>e)</i>
Eólica	Eléctrico	5.549	-240	-23,0	3
Cogeneración con bagazo	Eficiencia energética	1.860	-59	-6,0	5
Etanol de sorgo	Agrícola y forestal	991	-62	-5,1	5
Biodiesel de palma	Agrícola y forestal	99	-24	-2,4	6
Co-combustión con leña	Agrícola y forestal	454	-43	-2,4	7
Plantaciones	Agrícola y forestal	1.084	-153	-13,8	8
Pequeñas hidroeléctricas	Eléctrico	2.634	-86	-8,8	9
Reforestación y restauración	Agrícola y forestal	2.229	-169	-22,4	9
Etanol de caña	Agrícola y forestal	1.011	-150	-16,8	11
Geotermia	Eléctrico	11.797	-393	-48,0	12
Rehabilitación de refinерías	Petróleo y gas	1.553	-31	-2,5	17
UMA	Agrícola y forestal	169	-316	-27,0	18
Servicios ambientales	Agrícola y forestal	0	-51	-4,4	18

Fuente: Autores.

\* La inversión nueva para estas intervenciones es negativa, es decir, inferior a la línea base.

## APÉNDICE B

### RESUMEN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO

La costo efectividad se define como el valor presente (en 2008) del beneficio neto que se alcanza por reducir (evitar) una tonelada de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (\$/tCO<sub>2</sub>e) al implementar una opción particular (las definiciones de CO<sub>2</sub>e provienen de PICC 2007). Para cada intervención, se suman las reducciones anuales de emisiones (en \$/tCO<sub>2</sub>e) para calcular la reducción total de emisiones y el flujo de costos o beneficios netos anuales se actualiza al 10% anual para llegar al valor presente del costo o beneficio neto. Luego se calcula el coeficiente de costo efectividad dividiendo el primer monto por el segundo. La utilización del enfoque de la costo efectividad para el análisis beneficio-costo le evita al analista la necesidad de evaluar en forma directa el valor marginal (función de daños) de cada tonelada adicional de CO<sub>2</sub>e que se agrega a la atmósfera. Por otro lado, este enfoque permite realizar comparaciones entre las estimaciones de los daños producidos por cada tonelada de CO<sub>2</sub>e o bien los precios de mercado del CO<sub>2</sub>, por un lado, y las estimaciones de los costos por tonelada de CO<sub>2</sub>e para cada opción considerada, por otro.

El beneficio neto de una opción de mitigación se calcula substrayendo de los beneficios directos resultantes de la implementación de dicha opción, los costos directos financieros. Entre los beneficios directos se encuentran los ahorros en el costo de la energía o los ahorros en los tiempos o en los costos de viaje. Los beneficios indirectos, como las externalidades ambientales, no se cuantifican. Los costos financieros reflejan los costos de oportunidad económicos, en la medida en que se realizaron correcciones por impuestos y subsidios y que los bienes comercializados fueron evaluados a sus valores de paridad de importación y exportación.

Se realizaron comparaciones uno a uno entre las opciones particulares y la línea base (la alternativa que suponemos se hubiese seguido en ausencia del programa MEDEC). Los costos netos incrementales y las emisiones netas incrementales de los GEI se calculan sustrayendo los costos (o emisiones de GEI) de la opción de los costos (o emisiones de GEI) del caso de la línea base.

Para el análisis se utilizó un formato de costo efectividad en el cual el “producto” se cuenta pero no se evalúa en términos monetarios y los costos de los “insumos” se miden y evalúan en dólares estadounidenses constantes (de 2008). El producto en este caso es toneladas de CO<sub>2</sub>e evitadas por la opción (en relación con las emisiones en la alternativa de la línea base). Los beneficios son netos dado que incluyen los cobeneficios indirectos (ver más abajo). Se calculó entonces el costo por tonelada de las emisiones netas de CO<sub>2</sub>e evitadas (mitigadas) para cada opción.

En el formato de flujos anuales de caja, las emisiones de CO<sub>2</sub>e aparecen como un flujo de CO<sub>2</sub>e en ese año, pero se añaden a un *stock* (acumulación) de gases de efecto invernadero en la atmósfera que continuarán ahí hasta el final del período (2030). Puesto que descontar y actualizar son métodos matemáticos para convertir un recurso de flujo en un equivalente de *stock* al comienzo o al final del período, no sería apropiado actualizar o descontar un número (toneladas de CO<sub>2</sub>e) que ya representa un valor de *stock*. De este modo, el coeficiente de costo efectividad calculado representa el costo por tonelada de *stock* de CO<sub>2</sub>e evitado o mitigado durante todo el tiempo que hubiese permanecido en la atmósfera.

Cada opción analizada tiene una duración de proyecto que se basa en la vida económica (en lugar de la vida física) del activo más importante. Para los activos menos importantes que tienen vidas útiles más prolongadas que la del proyecto, se suma su valor de rescate al flujo de caja al final de la vida útil del proyecto. Para los activos cuya vida útil no es tan prolongada como la del activo más importante y por ende deben ser reemplazados oportunamente durante la vida útil del proyecto, la inversión correspondiente entra en el flujo de caja en más de un punto. Si la vida útil del proyecto no es divisible entre la vida útil de un activo con una vida útil más corta, el valor de rescate correspondiente al reemplazo final de este último se agrega al final de la vida útil regular del proyecto.

Una serie de proyectos similares constituye un *programa*. La duración de los programas es siempre de 2009 a 2030, mientras que los proyectos empiezan por lo general en distintas fechas. La mayoría de los proyectos termina después del fin del programa (2030), ya sea porque empiezan después de 2009 o porque sus activos (como las plantas generadoras de electricidad) tienen vidas útiles económicas que superan los 22 años. En este caso, se sumó al flujo de caja en el año 2031 el valor residual de los activos que tienen vida útil remanente con posterioridad al 2030. El valor residual incluye el valor neto de venta de cualquier activo más la recaptura de las existencias de capital de trabajo remanentes cuando se cierra la producción, ya sea prematuramente o al agotamiento del activo más importante. El valor neto de venta de los activos remanentes se llama *valor de rescate* si el activo tiene vida útil remanente no utilizada. Si el activo ha llegado al final de su vida útil económica, se aplica más comúnmente el término *valor de desecho*. La convención común respecto de los valores de desecho es suponer que los costos de eliminación son iguales al valor de mercado del desecho, lo que implica que el valor residual es igual a cero para esos activos.

Las opciones para la reducción de las emisiones de GEI que se analizaron para el portafolio MEDEC se limitaron a las tecnologías que ya se encuentran en uso o aquéllas que de manera realista se espera entren en operación dentro de un plazo de cinco años. Asimismo, no se supuso ningún progreso tecnológico una vez que las inversiones se materializan.

Un análisis económico riguroso normalmente comienza con el flujo de caja financiero del actor más importante, al que posteriormente se le realizan los siguientes ajustes:

1. Eliminar pagos de transferencia directos (impuestos y subsidios).
2. Dividir los insumos y productos entre bienes (y servicios) comercializados y no comercializados, y evaluar los productos comercializados a los valores de paridad de importación y exportación equivalentes.
3. Utilizar el análisis insumo-producto, u otros métodos, para ubicar y eliminar los impuestos y subsidios indirectos involucrados en la provisión de insumos no comercializados al proyecto.

4. Convertir los productos no comercializados en valores de disposición a pagar (lo cual implica un extenso análisis del grado de desarrollo del mercado y de las distorsiones del mercado en algunos casos).
5. Determinar las medidas cuantitativas de los impactos ambientales, desarrollar funciones de daño relacionadas con esos impactos y determinar los valores de la disposición a pagar o los valores de la disposición a aceptar una compensación para estas externalidades.

El análisis económico del escenario MEDEC comprendió solamente los primeros dos pasos de la secuencia de cinco que se menciona más arriba. Debido a la importancia de los cobeneficios ambientales en sus respectivos sectores, el equipo del sector transporte y el del sector electricidad intentaron completar los cinco pasos como un cálculo secundario, sin incluir estos cobeneficios en el cálculo del costo por tonelada de CO<sub>2</sub>e mitigada.

La función objetivo del estudio MEDEC es costo por tonelada de reducción o mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero distintos al CO<sub>2</sub> se convierten en equivalentes en términos de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e); otros impactos se convierten en costos netos o se ignoran. Los productos que son producidos conjuntamente con las disminuciones de las emisiones de GEI se dividen en categorías de cobeneficios directos e indirectos: Los cobeneficios directos (como los ahorros de tiempo y los ahorros en gastos por el uso de automóviles para los usuarios del transporte urbano, o bien los ahorros de energía por parte de los usuarios de aparatos electrodomésticos eficientes) se incluyen en el cálculo del costo neto en la medida de lo posible. Los cobeneficios indirectos (como las externalidades ambientales) se consideran donde es factible, pero sus valores correspondientes en términos de la disposición a pagar no se incluyen como cobeneficios en el cálculo del costo por tonelada de reducción de CO<sub>2</sub>e.

Los cálculos de costo por tonelada no incluyen las intervenciones organizativas e institucionales adicionales que podrían requerirse para vencer las barreras a la implementación de una opción. Por ejemplo, la opción de labranza cero no especifica la propiedad de la maquinaria o los costos organizativos necesarios para hacer que la maquinaria esté disponible para los agricultores que se espera utilicen estas nuevas prácticas; asimismo, los costos no incluyen los costos de información y educación requeridos para fomentar la propagación del método de labranza cero. Los costos de las opciones de electrodomésticos eficientes o de calentamiento solar de agua no incluyen los costos de organizar su distribución, convencer a la población de que estas opciones son mejores que las alternativas de altas emisiones y desarrollar sistemas de certificación, servicio y mantenimiento. Estos costos del proyecto no se pueden calcular hasta que no se identifiquen las intervenciones destinadas a eliminar las barreras existentes. El hecho de que se hayan omitido estos costos nos permite explicar en buena medida por qué muchas de las opciones analizadas en el estudio MEDEC tienen costos netos por tonelada negativos.

Cuando una intervención tiene beneficios netos positivos (o costos netos negativos), esto por lo general sugiere la presencia de barreras que impiden a los actores privados o a los organismos públicos actuar de una forma que tiene sentido desde el punto de vista de los cálculos de costo efectividad. Sin estas barreras, se supone que las inversiones rentables no se dejarían sobre la mesa. El hecho de que existan opciones para disminuir los GEI ganar-ganar sugiere

que la tarea que queda es identificar las barreras correspondientes, analizar la capacidad de vencerlas y diseñar las acciones requeridas para eliminarlas, vencerlas o eludirlas. La capacidad de superar las barreras y el costo de las intervenciones necesarias para vencerlas se convierte en el tercer criterio para clasificar las opciones de inversión (junto con el beneficio neto por tonelada que aporta dicha opción y el alcance que la opción provee para disminuir la emisión de GEI).

## APÉNDICE C

### SUPUESTOS DE LAS INTERVENCIONES

En el presente apéndice se describen los supuestos que se utilizaron durante el desarrollo del análisis. En primer lugar se presentan los supuestos generales y luego se detallan los supuestos específicos adoptados para cada sector.

Los supuestos generales utilizados en el análisis del estudio MEDEC son los siguientes:

- Duración escenario MEDEC: 22 años (2009-30).
- La duración de todos los programas de intervenciones es de 22 años. Cada uno de los programas está compuesto por una serie de proyectos, que pueden tener duraciones diferentes, por lo general de acuerdo con la vida útil de sus activos principales.
- Año cero de MEDEC: 2008.
- Tasa de actualización para costos y externalidades: 10%.
- Tasa de actualización para las emisiones de CO<sub>2</sub>e: 0.
- Dólares constantes del año: 2005.
- Tasa de crecimiento anual del PIB: 3,6%.
- Crecimiento promedio anual de la población: 0,6%.
- Cambios en tecnología: No se anticipan cambios importantes en tecnología durante el período del escenario.
- Costos (o beneficios) netos: Suma del valor presente neto de la inversión pública nueva, inversión privada nueva, inversión evitada, valor de rescate (el valor de rescate en 2031 se calculó en forma no lineal), costos de energía (incluye solamente los costos de la energía fósil), otros costos de operación y mantenimiento, costos de mano de obra, y costos de tiempo no pagado (los ahorros de tiempo se calcularon utilizando un salario mínimo de \$0,55/hora).
- Precios de los combustibles: Equivalentes a un precio del petróleo crudo del tipo West Texas Intermediate de aproximadamente \$53 por barril en 2009, y posteriormente un incremento gradual (ver cuadro C.1).

Factores de emisiones para combustibles fósiles: Factores estándar del PICC para las emisiones en *downstream* (“final del tubo”). Para las emisiones en los procesos *upstream* (refinación, transporte de combustibles, etc.), las fuentes son Yan (2008) para el gas LP, gasolina y combustóleo y Hondo (2005) para el combustóleo, gas natural, y carbón (las emisiones de coque en los procesos *upstream* se suponen igual a las del carbón) (cuadro C.2).

**Cuadro C.1** Supuestos de costos de combustibles para las intervenciones MEDEC

Tipo de combustible	Costo en 2009 (\$/GJ)	Aumento anual de costos (%)
Gasolina	15,98	0,567
Diesel	12,84	0,527
Combustóleo	7,39	0,403
Gas LP	12,09	0,469
Gas natural	7,85	0,190
Carbón	2,07	0,471
Coque	15,02	0,471

Fuente: Autores.

**Cuadro C.2** Emisiones downstream y upstream (t CO<sub>2</sub>e/GJ)

Tipo de combustible	Emisiones downstream	Emisiones upstream
Gasolina	0,0693	0,0160
Diesel	0,0741	0,0173
Combustóleo	0,0774	0,0038
gas LP	0,0631	0,0130
Gas natural	0,0561	0,0135
Carbón	0,0946	0,0090
Coque	0,1082	0,0090

Fuente: PICC 2007; Yan 2008; Hondo 2005.

## Sector eléctrico

De acuerdo con la Prospectiva del Sector Eléctrico oficial, se espera que la demanda crezca un 4,9% anual hasta el 2016 (SENER 2007). Para el período 2017-30 se supuso una tasa de crecimiento del 3,9% anual.

La selección de las tecnologías para la generación de electricidad (incluyendo nueva capacidad y retiros) para el período 2007-16 se sustenta en la prospectiva oficial. A partir del 2016 la selección de tecnologías está basada en los siguientes supuestos:

- La ampliación se basa en las proyecciones de la demanda y en satisfacer la curva de carga.
- La ampliación se basa en la tecnología de menor costo.

- Las centrales generadoras obsoletas se retiran del servicio.
- Se cumple con los requerimientos ambientales respecto de emisiones contaminantes (partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>).

Los costos de inversión se basan en valores internacionales (Banco Mundial, 2008). Los costos de operación y mantenimiento y los valores de consumo de combustible reflejan las condiciones locales de México (CFE, 2008a). Los costos unitarios son los mismos independientemente de la escala (no se consideran economías de escala). El costo del agua de enfriamiento para centrales térmicas se supone de \$0,679/m<sup>3</sup>. El cuadro C.3 muestra los costos supuestos para las tecnologías de carbón y gas natural.

**Cuadro C.3** Características de las tecnologías de línea base para carbón y gas natural

Característica	Carbón, central supercrítica	Gas natural, ciclo combinado
Inversión privada "overnight" (\$/[MWh/año])	321	203
Operación y mantenimiento (\$/MWh)	6,490	4,080
Externalidades (\$/MWh)	1,859	0,580
Uso de combustibles (GJ/MWh)	8,356	6,901
Capacidad (MW/[MWh/año])	0,00015245	0,00014671

Fuentes: Banco Mundial, 2008; CFE, 2008a.

Nota: La inversión real tiene lugar a lo largo de varios años; la inversión "overnight" es su equivalente en términos financieros el día que la central comienza a operar.

Estas consideraciones condujeron a un escenario de línea base sustentado principalmente en carbón, gas natural y energía hidroeléctrica (cuadro C.4). En este escenario, el carbón se utilizaría en las centrales generadoras de electricidad ubicadas en las zonas costeras próximas a los puertos para suministrar energía de base; el gas natural y la energía hidroeléctrica se utilizarían para las áreas geográficas internas y para la generación de electricidad en horas intermedias y pico. Teniendo en cuenta la disponibilidad de combustibles fósiles en México, es probable que en su mayor parte el carbón y gas considerados en el escenario de la línea base serían importados.

El análisis de las intervenciones MEDEC que generan, utilizan o ahorran electricidad (es decir, todas las intervenciones en el sector eléctrico más varias intervenciones en los sectores uso final estacionario de energía, petróleo y gas, y sector agrícola y forestal) fue desarrollado sobre la base de los siguientes supuestos:

- Las intervenciones MEDEC (incluyendo generación y eficiencia) reemplazan capacidad de producción del escenario de la línea base. Por lo tanto, la generación neta en el escenario MEDEC es igual al escenario de la línea base menos la energía total ahorrada en las intervenciones de eficiencia de uso final de energía.

**Cuadro C.4** Capacidad y generación de energía proyectadas en el escenario de la línea base

<i>Fuente de energía</i>	<i>Capacidad en 2008 (MW)</i>	<i>Capacidad nueva 2009-30 (MW)</i>	<i>Retiros 2009-30 (MW)</i>	<i>Capacidad en 2030 (MW)</i>	<i>Generación en 2030 (GWh)</i>
Gas natural	23.104	28.008	-4.095	47.016	293.353
Carbón	4.718	26.391	0	31.108	208.783
Hidráulica	11.466	13.727	0	25.193	86.784
Combustóleo	12.830	0	-7.112	5.718	26.826
Geotermia	960	976	-150	1.785	13.890
Uranio	1.365	269	0	1.634	12.610
Cogeneración con gas natural	2.069	314	0	2.383	10.828
Eólica	85	3.488	-85	3.488	9.090
Diesel	657	443	-106	995	4.345
Coque	507	0	0	507	3.711
Biomasa	325	0	0	325	815
Otros combustibles fósiles	152	0	0	152	307

Fuente: Autores.

Nota: Las cifras incluyen el servicio público y el autoabastecimiento.

- Cada una de las intervenciones MEDEC sustituye 86% de generación de electricidad con carbón (tecnología supercrítica) y 14% de generación de electricidad con gas natural (tecnología de ciclo combinado). Las excepciones a esta regla son la cogeneración en industrias y la cogeneración en Pemex, que sustituyen el 100% de generación de electricidad con gas natural (porque se les considera formas eficientes de utilización del gas natural, no intervenciones de reemplazo de combustibles).
- La capacidad total de carbón desplazada en el escenario MEDEC es igual a todas las centrales eléctricas a carbón nuevas contempladas en el escenario de la línea base (excepto la central Carboeléctrica del Pacífico de 678 MW, en el estado de Guerrero, que entrará en operación en el 2010).

Los costos evitados en generación de electricidad a carbón y gas natural incluyen los costos de inversión (proporcionales a la generación nueva de electricidad o a los ahorros de energía), los costos de operación y mantenimiento, los costos de combustibles fósiles y los costos de las externalidades ambientales (que no están incluidos en las cifras reportadas).

El análisis de las intervenciones de electricidad reconoce el hecho de que 1 MWh de electricidad ahorrado en la red de distribución implica más de 1 MWh ahorrado en generación de electricidad, debido a las pérdidas de electricidad en las redes de transmisión y distribución. Se utilizaron factores de pérdidas en el segmento distribución de 1.012 a nivel de subtransmisión, de 1.042 en la red de bajo voltaje primario y de 1.067 en la red de bajo voltaje secundario

(no había datos disponibles para México; los datos que se muestran corresponden a Southern California Edison, 2008).

### *Energía eólica*

- Definición del programa: Instalar una capacidad de generación eléctrica de 10.800 MW.
- Vida útil de las plantas: 21 años
- Factor de planta: 30%
- Usos propios (consumo de electricidad por la propia central): 0
- Costo de inversión: \$1.336.311/MW
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$27.458/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: 0
- Perfil de inversión: Un año
- Factores de costos de externalidades (análisis del ciclo de vida): SO<sub>2</sub>: \$0,003/MWh (bruto); sulfatos: \$0,224/MWh (bruto); PM10: \$0,094/MWh (bruto); NO<sub>x</sub>: \$0,043/MWh (bruto)

### *Pequeñas hidroeléctricas*

- Definición del programa: Instalar una capacidad de generación eléctrica de 2.750 MW
- Vida útil de las plantas: 30 años
- Factor de planta: 45%
- Usos propios: 0
- Costo de inversión: \$2.669.523/MW
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$36.161/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: \$4,329/MWh (bruto)
- Uso de agua: 12.028 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)
- Perfil de inversión: Un año
- Costo del agua para generación hidráulica: \$0,00030/m<sup>3</sup> (costo de oportunidad de utilizar el agua en otras aplicaciones)
- Factores de costos de externalidades (análisis del ciclo de vida): sulfatos: \$0,023/MWh (bruto); PM10: \$0,010/MWh (bruto)

### *Geotermia*

- Definición del programa: Instalar una capacidad de generación eléctrica de 7.500 MW
- Vida útil de las plantas: 30 años
- Factor de planta: 90%
- Usos propios: 0
- Costo de inversión: \$2.803.515/MW
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$146.269/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: \$0,041/MWh (bruto)
- Uso de agua para enfriamiento: 0,10 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)

- Consumo de vapor geotérmico: 19,29 GJ/MWh (bruto)
- Costo del vapor geotérmico, nivelado: \$1,922/GJ
- Porcentaje del costo del vapor que corresponde a exploración y otras inversiones iniciales: 85%
- Factor de costos de externalidades: 0
- Cronograma de inversión: Año -3: 2,5%; Año -2: 60%; Año -1: 37,5%

### Biogás

- Definición del programa: Instalar una capacidad de generación eléctrica de 930 MW
- Vida útil de las plantas: 21 años
- Se supone que en el escenario de la línea base, se captura y quema el biogás de rellenos sanitarios. Por lo tanto, no se tiene en cuenta la reducción de las emisiones de gas metano y no se incluyen los costos del relleno sanitario (se considera que el biogás está disponible gratis).
- Factor de planta: 80%
- Usos propios: 0
- Costo de inversión: \$3.226.104/MW
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$16.613/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: \$8,039/MWh (bruto)
- Perfil de inversión: Un año
- Factor de pérdidas de distribución: Voltaje de subtransmisión
- Factores de costos de externalidades: SO<sub>2</sub>: \$0,007/MWh (bruto); sulfatos: \$0,456/MWh (bruto); PM10: 0; NO<sub>x</sub>: \$0,539/MWh (bruto)

### Eficiencia en empresas eléctricas

- Definición del programa: Sustituir varios equipos auxiliares en centrales eléctricas y en las redes de transmisión y distribución
- Tipo de cambio: 10,8 pesos/\$
- Barril de petróleo equivalente por GWh: 2,4 BPE/MWh (Fuente: PAESE).
- Costos y ahorros: Ver cuadro C.5

## Sector petróleo y gas

### Reducción de fugas de gas

- Definición del programa: Reducir las emisiones por fugas de gas natural mediante el reemplazo de sellos de 46 compresores
- Vida útil de los sellos: 25 años
- Emisiones por compresor: 38,29 millones de pies cúbicos/año sin el proyecto, 6,22 millones de pies cúbicos / año con el proyecto (PGPB 2006)
- Emisiones *upstream*: No se incluyen
- Costo de inversión en sellos secos por compresor: \$444.000

**Cuadro C.5** Costos y ahorros para las acciones de eficiencia en empresas eléctricas

Concepto	Inversión total PAESE (millones de pesos por unidad)	Programa anual de ahorro de energía PAESE (barril de petróleo equivalente por unidad)	Cantidad de unidades en el programa	Vida útil (años)
<b>Centrales eléctricas</b>				
Diagnósticos energéticos <sup>a</sup>	1	n.a.	66	30
Variadores	2,1	2.637	198	10
Compresores	3	2.160	264	10
Torres de enfriamiento (ventiladores)	2	12.125	132	10
Generadores vapor-vapor	2	6.900	132	5
Controladores	2	50.000	132	10
Quemadores	2	50.000	132	5
Control de combustión con medidores de viscosidad	2	19.400	66	15
<b>Transmisión y distribución</b>				
PTC (Power temperature control) para subestaciones	0,08	54,6	660	30
Reemplazo de transformadores	0,075	20,8	14.520	30

Fuente: PAESE.

Nota: La cantidad total de unidades del programa y la vida útil de los activos se basan en la opinión de especialistas.

n.a. No aplica.

a. Los diagnósticos energéticos identificarían las mejoras potenciales, incluyendo mejoras en el mantenimiento de rutina y algunas inversiones de capital, y determinaría los ahorros de energía que se lograrían con la implementación de estas acciones.

**Cogeneración en Pemex**

- Definición del programa: Instalar una capacidad de cogeneración de 3.690 MW
- Vida útil de las plantas: 30 años

**Sin el proyecto**

- Capacidad de autoabastecimiento en Pemex: 2.130 MW (SENER 2008c)
- Factor de planta: 50% (datos de la CRE)
- Eficiencia de transformación del combustible a electricidad: 15%
- Costo de operación y mantenimiento: Igual que para una planta de cogeneración moderna (Costo fijo: \$29.050 (US\$/año)/MW; Costo variable: \$0,368 US\$/MWh [bruto])
- Eficiencia actual de la transformación del combustible a calor (caldera): 35%
- Costo de operación de la caldera: \$0,200/GJ combustible

### Supuestos de cogeneración

- Combustible: Gas natural. Varios esquemas de cogeneración se alimentarían con gas proveniente de la gasificación de residuos de vacío de refinería; sin embargo, puesto que la gasificación se debe realizar por otras razones, sus costos no se tienen en cuenta aquí.
- Factor de planta: 80%
- Usos propios: 2,74%
- Costo de inversión: \$1.505.000/MW
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$29.050/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: \$0,368/MWh (bruto)
- Uso de agua para enfriamiento: 2,06 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)
- Eficiencia de combustible a electricidad: 37%
- Eficiencia de combustible a calor: 42%
- Cronograma de inversión: Año -3: 7%; Año -2: 72%; Año -1: 20%
- Factores de costos de externalidades: SO<sub>2</sub>: \$0,001/GJ; sulfatos: \$0,044/GJ; PM10: \$0,011/GJ; NO<sub>x</sub>: \$0,028/GJ

### Rehabilitación de refinerías

- Definición del programa: Rehabilitación de las seis refinerías existentes en México
- Inversión: \$2.110.000 por cada mil barriles al día (kB/día) de petróleo crudo
- Consumo de energía de la refinería en la línea base por cada kB/día de petróleo crudo: gas natural: 0,252 millones de pies cúbicos/día; diesel: 0,008 kB/día; combustóleo: 0,036 kB/día; electricidad: 2,860 GWh/año; vapor: 3,631 t/hr
- Reducción en el uso de combustible: 12%
- Reducción en el uso de electricidad: 0
- Perfil de inversión: Años -3 a -1: 33%/año
- Datos y cronograma de refinería: Salina Cruz (2009): 308 kB/día; Tula (2012): 296 kB/día; Minatitlán (2015): 285 kB/día; Madero (2018): 188 kB/día; Cadereyta (2021): 235 kB/día; Salamanca (2024): 176 kB/día

### Sectores de uso final estacionario de energía

Varios de los supuestos para estos sectores se basan en estimaciones de Odón de Buen, experto en eficiencia energética.

Los supuestos para las intervenciones relacionadas con los sectores comercial y de servicios (edificios no residenciales) se muestran en el cuadro C.6.

### Aire acondicionado en edificios no residenciales

- Definición del programa: Instalar sistemas de aire acondicionado eficientes en todos los edificios no residenciales
- Vida útil de los sistemas: 30 años
- Demanda por tonelada de aire acondicionado estándar: 1,7 kW

**Cuadro C.6** Alcance de los ahorros de energía resultantes de las intervenciones de aire acondicionado e iluminación en edificios no residenciales, por tipo de edificio

Tipo de edificio	Superficie total de edificios (millones m <sup>2</sup> )	Cantidad de edificios (miles)	Porcentaje de edificios con aire acondicionado	Energía promedio para aire acondicionado (MJ/m <sup>2</sup> /año)	Porcentaje de edificios con tecnología de aire acondicionado obsoleta	Energía promedio para iluminación (MJ/m <sup>2</sup> /año)	Porcentaje de edificios con tecnología de iluminación obsoleta
Bodegas	5	1	50	100,00	80	170,33	75
Hoteles	12	13	80	289,94	70	281,04	25
Restaurantes	2	10	100	289,94	70	281,04	50
Edificios de oficinas	4	8	50	148,34	75	143,79	75
Comercio mayorista y minorista	15,2	2,1	100	177,18	75	171,75	75
Cines y centros recreativos	2,8	2	100	226,61	75	219,65	75
Hospitales y centros de salud	6	21	100	313,25	75	303,63	75
Escuelas	121	150	50	48,32	80	187,36	100
Otros servicios	110	200	50	50,00	80	100,00	50

Fuente: Con base en datos de NRCan (2007), ajustados para México, y supuestos de los autores.

Nota: Las cifras suponen el uso del aire acondicionado 10 horas por día para todos los tipos de edificios.

- Demanda por tonelada de aire acondicionado eficiente: 0,9 kW
- Costo por tonelada de un equipo de aire acondicionado eficiente: \$1,140
- Plazo para la implementación del programa completo: 10 años
- Vida útil del aire acondicionado: 30 años

### Iluminación en edificios no residenciales

- Definición del programa: Adelantar 10 años la instalación de sistemas de iluminación eficientes en todos los edificios no residenciales
- Vida útil de los sistemas: 10 años
- Potencia del equipo estándar (T12 con balastro electromagnético): 0,192 kW/dispositivo
- Potencia del equipo eficiente (T8 con balastro electrónico): 0,09 kW/dispositivo
- Costo por unidad eficiente: \$55/dispositivo
- Plazo para la implementación del programa completo: 10 años
- Horas por día de uso de la iluminación, para todos los tipos de edificios: 12
- Factor de pérdidas de distribución aplicable: Bajo voltaje primario

### Alumbrado público

- Definición del programa: Adelantar 10 años el reemplazo de todas las lámparas de alumbrado público en México por lámparas de sodio de alta presión
- Cronograma del proyecto: Todas las lámparas se reemplazan en un plazo de 10 años
- Horas de funcionamiento por año: 4.380
- Consumo de energía en 2006: 4.303.000 MWh
- Otros supuestos de tecnología: Ver cuadro C.7

### Motores industriales

- Definición del programa: Acelerar el retiro de los motores industriales obsoletos de alto uso y sustituirlos por motores de alta eficiencia
- Vida útil de los motores: 30 años
- Cronograma del proyecto: Todos los motores se reemplazan en un período de 7 años

Cuadro C.7 Supuestos de las tecnologías para alumbrado público

Aplicación/tipo de lámpara	Potencia (watts)	Lúmenes	Uso estimado(% del total)	Costo de una lámpara (\$)
<i>Avenidas principales</i>				
Vapor de mercurio	400	23.000	10,00	n.a.
Halógena (yodo-cuarzo)	1.000	21.000	2,50	n.a.
Sodio de alta presión	250	28.000	12,50	84,60
<i>Avenidas intermedias</i>				
Vapor de mercurio	250	13.000	7,50	n.a.
Fluorescente	215	14.800	2,50	n.a.
Iluminación mixta	500	14.750	2,50	n.a.
Sodio de alta presión	150	16.000	12,50	20,70
<i>Calles</i>				
Vapor de mercurio	125	6.300	12,50	n.a.
Incandescente	300	6.300	6,25	n.a.
Halógena (yodo-cuarzo)	300	6.000	3,13	n.a.
Fluorescente	85	5.250	3,13	n.a.
Sodio de alta presión	70	6.300	25,00	19,10

Fuente: Autores.  
n.a. No aplica.

- Factor de demanda para los motores de alto uso que se incluirán en el programa: 5.000 horas/año
- Eficiencia antes del reemplazo de motores: 86%

#### **Supuestos sin proyecto**

- Costo del motor estándar: \$25/HP (estudio de mercado)
- Eficiencia del motor estándar nuevo: 90% (norma actual)
- Período durante el cual tendría lugar el reemplazo del escenario de la línea base: 15 años

#### **Supuestos del proyecto**

- Factor de pérdidas de distribución aplicable: Voltaje de subtransmisión
- Costo del motor de alta eficiencia: \$57,50/HP (estudio de mercado)
- Eficiencia del motor de alta eficiencia: 96%
- Uso de electricidad reportado en la industria mexicana en 2007: 106.633 GWh/año (SENER 2008c)
- Consumo de electricidad reportado como “industrial” que realmente corresponde al sector servicios: 22.000 GWh/año
- Crecimiento anual del consumo de electricidad en la industria mexicana: 3,50% (SENER 2008c)
- Porcentaje de electricidad utilizado en motores en la industria: 70%
- Factor de demanda promedio para todos los motores industriales: 4.000 horas/año
- Porcentaje de la capacidad total de los motores incluidos en el programa (los que cumplen con los criterios del programa): 70%

### *Cogeneración en industrias*

- Definición del programa: Instalar una capacidad de cogeneración en industrias de 6.720MW

#### **Supuestos sin proyecto**

- Eficiencia de la caldera: 75%
- Costos de operación de la caldera: \$0,200/GJ combustible

#### **Supuestos de cogeneración**

- La central de cogeneración reemplaza la generación de electricidad centralizada con gas natural de ciclo combinado
- Combustible: Gas natural
- Vida útil de las plantas: 30 años
- Factor de planta: 80%
- Usos propios (por la central de cogeneración misma): 2,74%
- Costo de inversión: \$1.505.000/MW
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$29.050/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: \$0,368/MWh (bruto)

- Uso de agua para enfriamiento: 2,06 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)
- Eficiencia bruta de combustible a electricidad: 35%
- Eficiencia de combustible a calor: 40%
- Factor de pérdidas de distribución: Voltaje de subtransmisión
- Cronograma de inversión: Año -3: 7%; Año -2: 72%; Año -1: 20%
- Factores de costos de externalidades: SO<sub>2</sub>: \$0,001/GJ; sulfatos: \$0,044/GJ; PM10: \$0,011/GJ; NO<sub>x</sub>: \$0,028/GJ

### *Cogeneración con bagazo*

- Definición del programa: Instalar plantas de cogeneración eficientes en 55 ingenios azucareros

#### **Supuestos generales**

- Consumo de caña de azúcar por ingenio: 1 Mt caña de azúcar/año
- Coeficiente de producción de bagazo: 0,3 toneladas de bagazo/t caña
- Valor calórico del bagazo (50% de humedad): 8 GJ/t
- Consumo de energía eléctrica y mecánica por el ingenio: 0,04 MWh/t caña
- Porcentaje de la electricidad que actualmente se compra de la red: 25%
- Consumo actual de combustóleo: 8 l/t caña
- Días laborables del ingenio: 155 días/año

#### **Supuestos del proyecto**

- Vida útil de las plantas: 25 años
- Inversión en calderas, central eléctrica, transformadores: \$2,5 millones/MW
- Cronograma de inversión: 2 años, 50% en cada año
- Eficiencia eléctrica de la unidad de cogeneración: 20% (suponiendo un sistema con una presión de admisión a turbina de 62 bar, y contrapresión o presión de escape de 2 bar)
- Consumo de combustóleo con el proyecto de cogeneración: 0 l/t caña
- Se supone que los costos de operación y mantenimiento y las externalidades relacionadas con las emisiones locales son los mismos con y sin proyecto
- Factor de pérdidas de distribución: Voltaje de subtransmisión

### *Aire acondicionado residencial*

- Definición del programa: Proveer aislamiento térmico y acelerar el reemplazo de los acondicionadores de aire residenciales en 1 millón de viviendas de alto consumo

#### **Supuestos del proyecto**

- Costo del equipo nuevo \$488 (IEE 2006)
- Vida útil del equipo de aire acondicionado: 15 años
- Factor de pérdidas de distribución aplicable: Bajo voltaje secundario

**Supuestos sin proyecto**

- Consumo de energía antes del reemplazo: 4.000 kWh/año
- Período durante el cual tendría lugar el reemplazo del escenario de la línea base: 15 años
- Consumo después del reemplazo por un equipo que cumple con los estándares: 2.800 kWh/año

**Supuestos con proyecto**

- Consumo de energía con el nuevo equipo más el aislamiento térmico: 700 kWh/año
- Costo del aislamiento térmico: \$1.200

**Supuestos del programa**

- Cantidad total de viviendas incluidas en el programa: 1 millón (datos del INEGI)

***Iluminación residencial***

- Definición del programa: Reemplazar las lámparas más importantes en el 80% de las viviendas en México por lámparas fluorescentes

**Supuestos del mercado**

- Ventas anuales actuales de lámparas incandescentes: 210 millones de lámparas (CONUEE)
- Lámparas totales por vivienda: 8 (FIDE)
- Cantidad de lámparas fluorescentes en funcionamiento actualmente: 35 millones (supuesto de los autores)
- Se desarrolló un modelo que divide las lámparas de una vivienda en cuatro categorías con diferentes horas por día de uso, respondiendo a los supuestos enumerados más arriba. Los supuestos de las tecnologías se muestran en el cuadro C.8.

**Supuestos del programa**

- Cantidad de viviendas que pagan electricidad: 28,2 millones
- Cantidad de viviendas que no pagan: 1 millón
- El programa reemplazará lámparas que se usan por lo menos: 1 hora/día

**Cuadro C.8** *Supuestos de las tecnologías para iluminación residencial*

<i>Tipo de lámpara</i>	<i>Incandescente</i>	<i>Fluorescente</i>
Vida útil de laboratorio (horas)	1.000	8.000
Reducción en la vida útil por las variaciones de voltaje y otros factores (%)	25	25
Costo de la lámpara (\$)	0,50	3,00
Eficacia (lúmenes/watt)	16	60

Fuente: Autores.

- Cobertura del programa: 80% de las viviendas
- Factor de pérdidas de distribución aplicable: Bajo voltaje secundario

### *Refrigeración residencial*

- Definición del programa: Acelerar el reemplazo de los refrigeradores antiguos en México
- Factor de pérdidas de distribución aplicable: Bajo voltaje secundario

#### **Supuestos sin proyecto**

- Consumo de energía: 0,850 MWh/año (los refrigeradores más antiguos tienen un consumo mayor, de alrededor de 1,050 MWh/año, pero un gran número cumple con la norma de 1996)

#### **Supuestos con proyecto**

- Consumo de energía: 0,369 MWh/año
- Costo de un refrigerador nuevo de 9 pies cúbicos: \$203 (según estudio de mercado)
- Vida útil del refrigerador: 15 años

#### **Supuestos del programa**

- Refrigeradores que se reemplazarán con el programa: 10 millones de refrigeradores (según datos del INEGI)
- Período para alcanzar la meta: 5 años
- Período para el reemplazo en el escenario de la línea base: 20 años

### *Calentamiento solar de agua*

- Definición del programa: Instalar para el 2030 calentadores solares de agua en el 60% de las viviendas existentes en el 2009 y en el 65% de las viviendas nuevas

#### **Supuestos para las viviendas nuevas y existentes**

- Consumo de agua caliente: 75 l/día/persona
- Ocupación de la vivienda: 4 personas/vivienda (CONAPO 2006)
- Incremento requerido de temperatura: 25°C
- Tamaño del calentador solar de agua: 4 m<sup>2</sup>
- Vida útil: 22 años
- Radiación solar: 18 MJ/día/m<sup>2</sup> (PROCALSOL 2007)
- Eficiencia del calentador solar de agua: 50%
- Eficiencia del calentador a gas de agua: 60%
- En las viviendas con calentador solar se sigue usando gas como respaldo para suministrar el 10% de las necesidades de energía para el calentamiento de agua

#### **Supuestos para las viviendas existentes**

- Costo del calentador solar de agua: \$1.050
- Costo de instalación: \$262

- Cantidad de viviendas en 2009: 27,5 millones
- Porcentaje de viviendas de 2009 que tendrán calentamiento de agua (de cualquier tipo) en el 2030: 60%

De este conjunto de viviendas, las que contarán con calentador solar de agua en el 2030 son:

- a) en el escenario de la línea base: 1%
- b) en la intervención: 60%

#### **Supuestos para la viviendas nuevas**

- Costo del calentador solar de agua para viviendas nuevas: \$875
- Costo de instalación: \$175
- Cantidad de viviendas en el 2030: 39 millones (CONAPO 2008)
- Cantidad de viviendas nuevas con calentamiento de agua (de cualquier tipo) en 2009-30: 80%

De este conjunto de viviendas, las que contarán con calentador solar de agua en el 2030 son:

- a) en el escenario de la línea base: 10%
- b) en la intervención: 65%

### *Estufas mejoradas de leña*

- Definición del programa: Instalar estufas (cocinas) mejoradas de leña en todas las viviendas que tienen los fogones abiertos tradicionales

#### **Supuestos del proyecto**

- Inversión por única vez en capacitación y promoción: \$34 / estufa
- Inversión: \$84,45 / estufa
- Vida útil de la estufa: 4 años
- Tasa de adopción: 60%
- Costos anuales de control y administración: \$16/estufa
- Costo anual de mantenimiento: \$14/estufa
- Consumo anual de leña en fogones a cielo abierto (materia seca): 4,2 t<sub>MS</sub>/estufa
- Factor de ahorro para estufa mejorada: 50%
- Factor de emisiones para fogón a cielo abierto: 2 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>MS</sub> (Johnson *et al.*, 2009)
- Factor de emisión para estufa mejorada: 1,62 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>MS</sub> (Johnson *et al.*, 2009)
- (Los factores de emisión incluyen GEI no incluidos en el Protocolo de Kioto)
- Costo de la leña: \$26,25/t<sub>MS</sub> (García-Frapolli *et al.*, de próxima publicación)
- Ahorro efectivo de tiempo por día debido al uso de la estufa: 0,25 horas/día/estufa (García-Frapolli y otros, de próxima publicación)
- Beneficios resultantes de daños reducidos a la salud y protección al medio ambiente (externalidades): \$341,64/estufa/año (García-Frapolli *et al.*, de próxima publicación)

### Supuestos del programa

- Cantidad de viviendas que utilizan leña en México en el 2030 en el escenario de la línea base: 3.878.070
- Productividad de la leña: 2,9 t<sub>MS</sub>/ha/año

### Sector transporte

- Supuestos del escenario de la línea base: Ver cuadro C.9
- Impacto sobre los costos de tiempo no pagado (tiempo perdido por la sociedad debido a la congestión del tránsito): 0,030 hora/km de la distancia total urbana
- Área urbana, 2009: 11.854 km<sup>2</sup>
- Crecimiento anual del área urbana: 0,89%

**Cuadro C.9** Supuestos del escenario de la línea base para el sector transporte

Concepto	Vehículos a gasolina	Vehículos diesel
Parque automotor, 2009 (millones)	24,4	1,27
Parque automotor, crecimiento anual (%)	5	4
Eficiencia promedio, 2009 (km/litro)	7,87	3,08
Crecimiento anual promedio en eficiencia (%)	1,64	0,23
Distancia total promedio, 2009 (km/año/vehículo)	14.167	59.416
Distancia urbana como porcentaje de la distancia total promedio, 2009	92,5	34,84
Externalidades (dólares por litro de combustible utilizado en áreas urbanas)	0,04	0,06

Fuente: Supuestos del Centro de Transporte Sustentable de México, A.C. y de los autores.

### Optimización de rutas de transporte público

- Definición del programa: Rediseñar todas las líneas secundarias de transporte masivo (minibuses) en México y efectuar cambios institucionales (las líneas troncales principales están cubiertas por la intervención de sistemas de transporte tipo BRT)
- Kilometraje minibuses: 73.000 km/año/bus
- Porcentaje de redundancia sin proyecto: 34% (de acuerdo con el plan de transporte de la ciudad de Querétaro)
- Eficiencia minibuses: 2,9 km/l
- Vida útil de los minibuses: 12 años
- Costo minibuses: \$40.000/minibus
- Costo anual de mantenimiento por minibus: \$1.034
- Salario del chofer (dos choferes por minibus): \$556/mes/chofer
- La intervención supone que no hay costos de inversión nueva, solamente inversiones evitadas

- Supuesto del escenario de la línea base para la cantidad de minibuses en el 2030: 1,1 millones

### *Densificación urbana*

- Definición del programa: Reducir el crecimiento anual del área urbana de 0,89% a 0,4%
- Tasa de crecimiento de la superficie: 45% de la tasa del escenario de la línea base
- Intervalo de tiempo para alcanzar los resultados: 3 años
- Costo de infraestructura /km<sup>2</sup>: \$4.088.342 para las ciudades de baja densidad, \$4.566.235 para las ciudades de alta densidad (Transit Cooperative Research Program 1998)
- Costos anuales de operación/ km<sup>2</sup>: \$290.563 para las ciudades de baja densidad, \$525.764 para las ciudades de alta densidad (Transit Cooperative Research Program 1998)
- Esta intervención supone que no se necesita inversión nueva, solamente se evitan inversiones. La reducción del crecimiento de la superficie urbana involucra una reducción de las distancias de los viajes urbanos proporcional a la raíz cuadrada de la superficie urbana, la reducción de los costos de infraestructura urbana y de operación, y la reducción de los costos de tiempo no pagado, de manera proporcional a las distancias.

### *Sistemas de transporte tipo BRT*

- Definición del programa: Establecer 122 líneas tipo BRT (*bus rapid transit*)
- Longitud de la línea: 15 km
- Pasajeros por línea: 125.000 viajes/día
- Cantidad de autobuses estándar reemplazados por un autobús articulado: 4
- Cantidad de autobuses articulados por línea: 50
- Longitud promedio del viaje: 11 km
- Costo de infraestructura: \$1,8 millón/km
- Costo del autobús articulado: \$300.000/bus
- Costo del autobús estándar: \$120.000/bus
- Vida útil del autobús articulado: 12 años
- Vida útil del autobús estándar: 12 años
- Kilometraje del autobús estándar: 73.000 km/año
- Kilometraje del autobús articulado: 250 km/día
- Factor de uso del autobús articulado: 300 días/año
- Costo de mantenimiento del autobús articulado: \$0,26/km
- Salario del chofer del autobús articulado: \$741/mes
- Costo anual de mantenimientos del autobús estándar: \$1.034/autobús/año
- Salario del chofer del autobús estándar: \$556/mes
- Choferes: 2 choferes/autobús
- Otros supuestos: Ver cuadro C.10

**Cuadro C.10** Supuestos para vehículos y pasajeros antes y después de la intervención de sistemas tipo BRT

Vehículo	Viajes evitados <sup>a</sup> (%)	Ocupación vehicular (pasajeros/ vehículo)	Eficiencia vehicular (km/l)	Combustible
Automóvil privado	10	1,3	9,3	Gasolina
Taxi	6	1,2	10	Gasolina
Autobús estándar	84	27,3	2,3	Diesel
Autobús articulado	n.a.	130	1,8	Diesel

Fuente: Supuestos del Centro de Transporte Sostenible de México, A.C.

a. Porcentaje de pasajeros del sistema tipo BRT que viajaban por otros medios de transporte antes de utilizar este sistema.

n.a. No aplica.

### Transporte no motorizado

- Definición del programa: Aumentar la proporción de viajes en bicicleta en las ciudades mexicanas al 6% en el 2030, por medio de la construcción de ciclopistas (bicisendas)

#### Supuestos del proyecto

- Longitud de la ciclopista: 100 km
- Costo de la ciclopista: \$110.000/km
- Bicicletas compradas por los usuarios: 200 bicicletas/km de ciclopista
- Costo de la bicicleta: \$100/bicicleta
- Vida útil de la bicicleta: 5 años
- Vida útil de la ciclopista: 60 años
- Longitud promedio del viaje: 11 km
- Viajes por año en el año 2030: 14,8 millones de viajes/año
- Longitud total de las ciclopistas que se construirán: 37.500 km (según la experiencia de Portland, Oregon, donde una densidad similar de ciclopistas llevó al 6% de viajes por bicicleta)

#### Supuestos sin proyecto

- Costos de infraestructura vial: \$5 millones
- Vida útil de la infraestructura vial: 10 años
- Mantenimiento vial: \$400.000/año
- Costo del automóvil: \$7.500/automóvil
- Mantenimiento del automóvil: \$750/año
- Automóviles evitados: 2 automóviles/km de ciclopista
- Vida útil del automóvil: 12 años
- Otros supuestos: Ver cuadro C.11

**Cuadro C.11** Supuestos para vehículos y pasajeros antes de la intervención de transporte no motorizado

<i>Vehículo</i>	<i>Viajes evitados como resultado de la intervención (%)</i>	<i>Ocupación vehicular (pasajeros/ vehículo)</i>	<i>Eficiencia vehicular (km/l)</i>	<i>Combustible</i>
Autobuses	62,4	15	2,3	Diesel
Automóviles	29,2	1,3	9,3	Gasolina
Motocicletas	5,2	1	15	Gasolina
Taxis	3,1	1,2	10	Gasolina

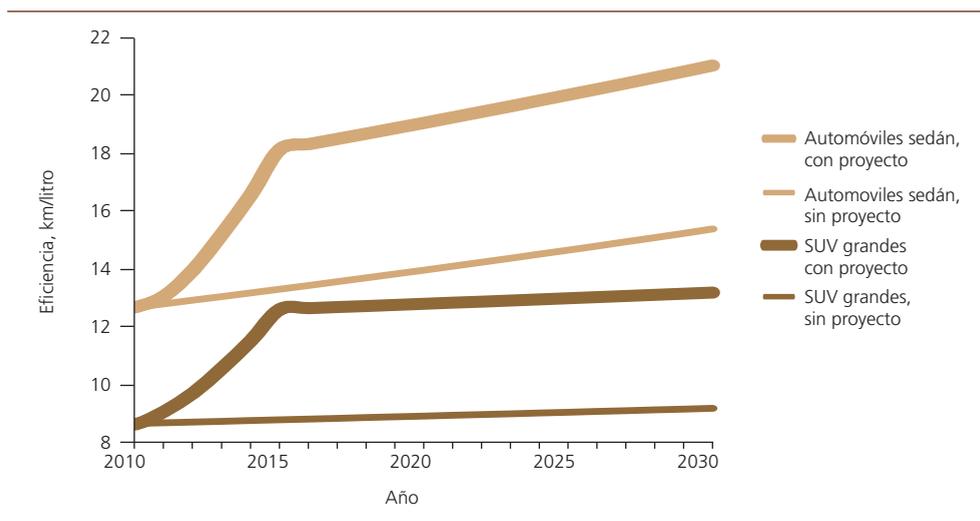
Fuente: Supuestos del Centro de Transporte Sustentable de México, A.C., en base a la experiencia de Portland, Oregon.

### *Norma vehicular*

- Definición del programa: Establecer un norma de eficiencia para automóviles, camionetas tipo SUV y camionetas de carga en México
- Duración del proyecto: 30 años
- Incremento de la eficiencia: Las normas se aplican a partir del 2011; crecimiento exponencial hasta el 2015, luego crecimiento lineal (gráfico C.1).
- Vida útil del vehículo: 15 años
- Costos adicionales calculados sobre la base de estudios realizados por ARB (2009)

### *Verificación vehicular en 21 grandes ciudades*

- Definición del programa: Implementar el esquema de verificación vehicular en 21 grandes ciudades de México (excluyendo al área metropolitana de la Ciudad de México, que ya cuenta con un programa de verificación), con una restricción de un día por semana para los vehículos con mayor antigüedad
- Porcentaje del parque vehicular total en 21 grandes ciudades: 41%
- Porcentaje de vehículos a gasolina en grandes ciudades que estarían sujetos a la verificación vehicular, 2009: 95,65% (el porcentaje restante corresponde a otros vehículos tales como motocicletas)
- Factor de cambio anual para dicho porcentaje: -0,9974
- Porcentaje de vehículos sujetos a la restricción de un día por semana, año 1: 70
- Factor de cambio anual para dicho porcentaje: -0,9833
- Porcentaje de la reducción de distancia recorrida para los vehículos restringidos: 23%
- Costo de inspección: \$46/año/vehículo
- Costo de mantenimiento adicional: \$55/año/vehículo
- Participación de mano de obra en los costos de verificación vehicular: 40%

**Gráfico C.1** Eficiencia proyectada de vehículos con y sin la norma propuesta, 2010-30

Fuente: Supuestos del Centro de Transporte Sostenible de México, A.C.

### Verificación vehicular fronteriza

- Definición del programa: Verificación de vehículos usados importados, a fin de asegurar el cumplimiento con las normas nacionales sobre emisiones de contaminantes
- Cantidad estimada de vehículos usados importados, 2009: 890.000
- Crecimiento anual estimado de la cantidad de vehículos usados importados: 4%
- Porcentaje estimado de vehículos usados que no cumplirían con los estándares nacionales: 20%
- Vida útil remanente para los vehículos usados importados: 8 años
- Costos (se supone que solamente los vehículos importados que aprueban la verificación incurrirán en estos costos):
  - Mantenimiento adicional: \$55/vehículo
  - Inspección: \$92/vehículo
  - Participación de mano de obra en los costos: 40%

### Logística de carga por carretera

- Definición del programa: Reemplazar todos los “hombres-camión” en el país por empresas o cooperativas de transporte de carga
- Se supone que una sola empresa con 80 camiones provee el mismo servicio que 100 “hombres-camión”, debido al mejoramiento de la logística (reducción de viajes vacíos)
- Eficiencia del camión: 3,4 km/l
- Kilometraje del camión: 70.000 km/año

- Costo del camión: \$300.000/camión
- La intervención supone que no se realiza inversión nueva; solamente hay inversiones evitadas
- Vida útil del camión: 12 años
- Mantenimiento el camión: \$20.000/camión/año
- Salario del chofer de camión: \$741/mes
- Choferes: 2/camión
- Costos de administración por empresa: \$1,5 millón/año
- Cantidad de “hombres-camión” que se reemplazarán: 1 millón

### Carga por ferrocarril

- Definición del programa: Transportar el 45% de la carga total de larga distancia por ferrocarril para el 2030
  - Supuestos de carga por carretera y por ferrocarril: Ver cuadro C.12
  - Carga actual de larga distancia: 321.000 Mt • km /año
  - Participación actual del ferrocarril: 7,6%
  - Carga de larga distancia esperada en el 2030: 658.000 Mt • km/año
- Participación esperada del ferrocarril en el 2030:
- a) en el escenario de la línea base: 7,6%
  - b) en la intervención: 37,0%

Cuadro C.12 Supuestos para el transporte de carga por carretera y por ferrocarril

Concepto	Carretera	Ferrocarril
Capacidad (toneladas)	30	3.000
Factor de carga (%)	70	100
Eficiencia de combustible (km/litro)	1,20	0,033
Costos de operación y mantenimiento excluyendo el combustible (\$/viaje) <sup>a</sup>	900	90.000

Fuente: Autores.

a. Se supone un viaje de 600 km.

### Sector agrícola y forestal

- Los supuestos generales para el sector son los siguientes:
- Supuestos de transporte de larga distancia (para combustibles de biomasa):
- Capacidad del camión: 16 toneladas/camión
- Costo fijo de transporte: \$92,59/viaje
- Costos variables de transporte, excluyendo el diesel: \$0,38/km
- Participación del costo de mano de obra en los costos fijos y variables de transporte: 50%
- Consumo específico de diesel: 0,33 l/km

- Tasa anual de deforestación en la línea base: 0,5%
- Tasa anual de degradación en la línea base: 0,7%
- Emisiones provenientes de la deforestación: 143,9 tCO<sub>2</sub>/ha
- Emisiones provenientes de la degradación: 28,3 tCO<sub>2</sub>/ha (la degradación ocurre en la realidad en el transcurso de varios años, pero aquí se supone que ocurre en un solo año a fin de simplificar el modelo)

### Generación de electricidad con biomasa

- Definición del programa: Instalar una capacidad de generación eléctrica con biomasa de 5.000 MW

#### Supuestos de la Central Eléctrica

- Factor de planta: 80%
- Usos propios: 5%
- Eficiencia bruta: 20%
- Vida útil: 23 años
- Costo de inversión: \$2,25 millones/MW (Martin 2008)
- Costo directo de mano de obra: \$5,37/MWh (bruto) (según datos de CBC 2008)
- Gestión y administración: \$0,54/MWh (bruto) (según datos de CBC 2008)
- Mantenimiento: \$4,03/MWh (bruto) (según datos de CBC 2008)
- Seguro: \$3,76/MWh (bruto) (según datos de CBC 2008)
- Costos variables de operación y mantenimiento:
- Compras: \$1,07/MWh (bruto) (CBC 2008)
- Eliminación de ceniza: \$0,54/MWh (bruto) (CBC 2008)
- Otros gastos de operación: \$0,75/MWh (bruto) (CBC 2008)
- Uso de agua para enfriamiento: 2,00 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)
- Cronograma de inversión: Año -3: 10%; Año -2: 40%; Año -1: 50%
- Factores de costos de externalidades: SO<sub>2</sub>: \$0,010/MWh (bruto); sulfatos: \$0,669/MWh (bruto); PM10: \$0,054/MWh (bruto); NO<sub>x</sub>: \$1,227/MWh (bruto)

#### Supuestos de producción de biomasa y de manejo forestal

- Tasas de deforestación y degradación con proyecto: 0
- Poder calorífico superior de la leña: 19 GJ/t<sub>MS</sub> (tonelada de materia seca) (De Jong y Olguín-Álvarez, 2008)
- Productividad de la leña: 2,9 t<sub>MS</sub>/ha/año (De Jong y Olguín-Álvarez, 2008)
- Costos de manejo forestal, cada 10 años: \$35/ha
- Productividad de madera en rollo: 1,3 t<sub>MS</sub>/ha/año
- Precio de la madera en pie: \$92,59/t<sub>MS</sub>
- Costos de cosecha de leña a pie de camino: \$26,24/t<sub>MS</sub>
- Porcentaje de mano de obra en los costos de cosecha: 65
- Costos de manejo y astillado de leña: \$8,50/t<sub>MS</sub>
- Superficie cosechable (superficie cercana a la central eléctrica disponible para cosecha): 30%
- Emisiones provenientes de la combustión de leña: 0,050 tCO<sub>2</sub>e/MWh

### Co-combustión con leña

- Definición del programa: Modernización de las seis unidades de la central eléctrica Petacalco, con una capacidad conjunta de 2.100 MW, de manera que sean operadas con una mezcla de 80% de carbón y 20% de biomasa.

#### Supuestos de la central eléctrica sin proyecto

- Factor de planta: 90%
- Usos propios: 7,2%
- Costo fijo de operación y mantenimiento: \$34.619/año/MW
- Costo variable de operación y mantenimiento: \$0,198/MWh (bruto)
- Uso de agua para enfriamiento: 2,79 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)
- Eficiencia bruta: 40,81%
- Factores de costos de externalidades: SO<sub>2</sub>: \$0,261/MWh (bruto); sulfatos: \$17,440/MWh (bruto); PM10: \$1,995/MWh (bruto); NO<sub>x</sub>: \$1,798/MWh (bruto)

#### Supuestos de la central eléctrica con proyecto

- Factor de planta: 87%
- Uso de biomasa: 20%
- Usos propios: 7,2%
- Costos de inversión de la modernización: \$260.000/MW
- Vida útil de la modernización: 21 años
- Costos fijos de operación y mantenimiento: \$34.619/año/MW
- Costos variables de operación y mantenimiento: \$0,198/MWh (bruto)
- Uso de agua para enfriamiento: 2,79 m<sup>3</sup>/MWh (bruto)
- Eficiencia bruta: 37,81%
- Cronograma de inversión: Un año
- Factores de costos de externalidades: SO<sub>2</sub>: \$0,061/MWh (bruto); sulfatos: \$0,000/MWh (bruto); PM10: \$0,381/MWh (bruto); NO<sub>x</sub>: \$1,045/MWh (bruto)
- Emisiones de GEI por la combustión de leña: 0,050 tCO<sub>2</sub>e/MWh

#### Supuestos de producción de biomasa y de manejo forestal

- Tasas de deforestación y degradación con proyecto: 0
- Poder calorífico superior de la leña: 19 GJ/t<sub>MS</sub> (De Jong y Olguín-Álvarez, 2008)
- Productividad de la leña: 2,9 t<sub>MS</sub>/ha/año (De Jong y Olguín-Álvarez, 2008)
- Costos de manejo forestal, cada 10 años: \$35/ha
- Productividad de madera en rollo: 1,3 t<sub>MS</sub>/ha/año
- Precio de la madera en pie: \$92,59/t<sub>MS</sub>
- Costos de cosecha de leña a pie de camino: \$26,24/t<sub>MS</sub>
- Porcentaje de mano de obra en los costos de cosecha: 65
- Costos de manejo y astillado de leña: \$16,00/t<sub>MS</sub>
- Superficie cosechable: 30%

### Producción de carbón vegetal

- Definición del programa: Parte A: Satisfacer el 75% de la demanda industrial de coque en México con carbón vegetal
- Parte B: Mejorar la producción de carbón vegetal para el consumo urbano (residencial y comercial), asegurando un manejo forestal sostenible y reemplazando los hornos tradicionales por hornos mejorados para el 70% de la producción de carbón vegetal.

#### Supuestos del proyecto, parte A

- Tamaño del módulo: 500 has
- El módulo se divide en 10 rodales iguales (la explotación se desarrollará en ciclos de 10 años. Cada año se explota un nuevo rodal)
- Volumen en pie promedio: 150 m<sup>3</sup>/ha
- Corte promedio permitido por rodal: 45 m<sup>3</sup>/ha
- Superficie por horno: 3,125 ha
- Contenido de materia seca: 65 t<sub>MS</sub>/m<sup>3</sup> madera
- Conversión de madera a carbón vegetal (hornos mejorados): 0,3 t carbón vegetal/t<sub>MS</sub>
- Costos de producción de carbón vegetal en gran escala: Ver cuadro C.13
- Costos de operación: \$162/t carbón vegetal
- Porcentaje de mano de obra en los costos de operación: 80%
- Transporte promedio de larga distancia: 400 km
- Motosierras: 8 motosierras/módulo
- Consumo de gasolina por motosierra: 3 l/día/motosierra
- Uso de las motosierras: 200 días/año
- Capacidad de los camiones pequeños para transporte local: 5 m<sup>3</sup>/viaje
- Consumo de gasolina por viaje de camión pequeño: 3 l/viaje
- Emisiones de GEI distintos al CO<sub>2</sub> en los hornos de carbón vegetal: 1,108 tCO<sub>2</sub>e/t carbón vegetal (Pennise *et al.*, 2001)
- Coeficiente de reemplazo de coque: 1,00 t carbón vegetal/t coque

#### Supuestos de producción de biomasa y de manejo forestal

- Tasas de deforestación y degradación con proyecto: 0
- Costos de manejo forestal, cada 10 años: \$35/ha
- Productividad de madera en rollo del módulo: 1,3 t<sub>MS</sub>/ha/año
- Precio de la madera en pie: \$92,59/t<sub>MS</sub>

#### Supuestos del programa

- Demanda nacional de coque 2009: 3,29 Mt/año
- Proyección de la demanda nacional de coque para el 2031: 9,5 Mt/año

**Cuadro C.13** Costos de producción de carbón vegetal en gran escala

Costos de producción	Costo (dólares)	Vida útil (años)
Preparación del programa de manejo forestal (un módulo, 500 ha)	9.259	10
Brechas cortafuego y construcción de carreteras 3.000 metros por rodal, primer año	27.778	1
3.000 metros por rodal, años posteriores	20.833	1ª
Hornos	26.667	2ª
Camión de 4 toneladas de segunda mano	4.630	3
Motosierras	5.926	1

Fuente: Estimaciones de Enrique Riegelhaupt y Tere Arias, especialistas en carbón vegetal.

a. Los rodales consecutivos son adyacentes y pueden utilizar caminos y hornos construidos con anterioridad.

#### Supuestos del proyecto, parte B

- Producción de carbón vegetal por horno mejorado: 54 t carbón vegetal/año/horno
- Costo de la leña: \$26/t<sub>MS</sub> leña
- Costo de mano de obra: \$12/día
- Precio del carbón vegetal: \$185/t
- Supuestos de los hornos de carbón vegetal tradicional y mejorado: Ver cuadro C.14
- Demanda estimada de carbón vegetal en el 2008: 592.102 t carbón vegetal/año
- Crecimiento anual estimado de la demanda de carbón vegetal: 0,8%
- Productividad de la leña: 2,9 t<sub>MS</sub>/ha/año

**Cuadro C.14** Supuestos para los hornos de carbón vegetal tradicionales y mejorados

Supuestos	Horno tradicional	Horno mejorado
Coefficiente carbón vegetal/leña (t carbón vegetal/t <sub>MS</sub> )	0,18	0,30
Días de mano de obra por tonelada de producción	6,00	2,22
Inversión por horno (\$)	n.a.	\$1.980
Operación y mantenimiento del primer año por horno (costos de capacitación y supervisión) (\$)	n.a.	\$146
Vida útil (años)	n.a.	5
Emissiones de CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> e/t carbón vegetal)	2,403	1,382
Emissiones de otros gases (CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O) (t CO <sub>2</sub> e/t carbón vegetal)	1,106	1,108
Porcentaje de no renovabilidad	80	0

Fuente: Pennise *et al.*, 2001, y estimaciones de Enrique Riegelhaupt y Tere Arias, especialistas en carbón vegetal.

n.a. No aplica.

### Manejo forestal

- Definición del programa: Colocar 9 millones de hectáreas bajo manejo forestal
- Costos de manejo forestal: \$35,00/ha/10 años
- Costos de operación y mantenimiento: \$36,50/ha/año
- Ingresos por ventas de madera: \$120/ha/año
- Ingresos sin proyecto (costos de oportunidad): \$31,50/ha/año

### Manejo de vida silvestre (UMA)

- Definición del programa: Colocar 30 millones de hectáreas bajo manejo de vida silvestre, siguiendo el modelo de las Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA)
- Costo de inversión: \$15/ha
- Costos de operación y mantenimiento: \$36,50/ha/año
- Ingresos por el agroturismo: \$4/ha/año
- Ingresos sin proyecto (costos de oportunidad): \$31,50/ha/año

### Pago por servicios ambientales

- Definición del programa: Colocar 5 millones de hectáreas bajo un esquema de compensación por servicios ambientales
- Costo de inversión: 0
- Costos de operación y mantenimiento: \$35,19/ha/año
- Ingresos con proyecto: 0
- Ingresos sin proyecto (costos de oportunidad): \$31,50/ha/año

### Plantaciones

- Definición del programa: Crear plantaciones en 1,5 millón de hectáreas

#### Supuestos del proyecto

- Inversión: \$1.120/ha
- Mantenimiento: \$230/ha/año (esto es considerado como inversión en el análisis económico porque se eroga solamente durante los primeros cinco años)
- Costos de oportunidad: \$140/ha/año
- Factor de cosecha forestal: 30%
- Patrón de cosecha: Primera cosecha del 30% en el año 10; segunda cosecha del 30% en el año 20; cosecha final (100%) en el año 30
- Valor de madera en pie: \$20/m<sup>3</sup>
- Porcentaje de contenido de carbón de la cosecha que se emite a la atmósfera: 50%

#### Supuestos de secuestro de carbono

- Crecimiento: 9,92 m<sup>3</sup>/ha/año
- Peso específico: 0,6 t<sub>MS</sub>/m<sup>3</sup>
- Contenido de carbono de la materia seca: 0,48 t C/t<sub>MS</sub>

### Reforestación y restauración

- Definición del programa: Reforestar o restaurar 4,5 millones de hectáreas de bosque

#### Supuestos del proyecto

- Inversión: \$1.119,57/ha
- Mantenimiento: \$229.56/ha/año (esto es considerado como inversión en el análisis económico puesto que tiene lugar solamente durante los primeros cinco años)

#### Supuestos sin proyecto

- Productividad del ganado: 40 kg/ha/año
- Precio del ganado por kg (vivo): \$2
- Gastos como porcentaje de los ingresos brutos: 80%

#### Supuestos de secuestro de carbono

- Crecimiento del bosque: 4,71 m<sup>3</sup>/ha/año
- Peso específico: 0,6 t<sub>MS</sub>/m<sup>3</sup>
- Contenido de carbono de la materia seca: 0,48 tC/t<sub>MS</sub>

### Maíz con labranza cero

- Definición del programa: Convertir 2,5 millones de hectáreas de agricultura tradicional de maíz al sistema de labranza cero

#### Supuestos del proyecto

- Costos de oportunidad: \$139/ha/año (FIRA 2006a y 2006b)
- Servicios técnicos: \$37/ha/año (FIRA 2006a y 2006b)
- Costos de administración: 15% de los costos variables (FIRA 2006a y 2006b)
- Costos del tractor por hora, excluyendo el diesel: \$19/hora
- Costos de mano de obra: \$11/día
- Consumo de diesel por tractor: 8,21l/hora
- Precio del maíz: \$259/t (encuesta de mercado)
- Precio del rastrojo: \$74/t (encuesta de mercado junio de 2008: \$Mex20 por bolsa de 25 kg)
- Producción de rastrojo: 5 t/ha/año (Etchevers, Tinoco y Riegelhaupt 2008)
- Costos de la línea base y labranza cero: Ver cuadro C.15
- Costo de la maquinaria adicional: \$40.000 (Etchevers, Tinoco y Riegelhaupt 2008)
- Vida útil de la maquinaria: 8 años
- Superficie cubierta por una máquina: 810 ha/año (60 días/año × 13,5 ha/día)
- Incorporación de materia orgánica estable al suelo: 0,20 t/ha/año
- Contenido de carbono en la materia orgánica: 85%

### Etanol de caña

- Definición del programa: Desarrollar 1,5 millones de hectáreas de producción de etanol de caña

### Supuestos del proyecto

- Capacidad de un ingenio etanolero típico: 85.000 m<sup>3</sup> etanol/año; 500m<sup>3</sup>/día
- Vida útil: 25 años
- Costo unitario de inversión: \$388/(m<sup>3</sup> etanol/año)
- Perfil de inversión: Año -4: 9,1%; Año -3: 22,7%; Año -2: 27,3%; Año -1: 40,9%
- Operación y mantenimiento del ingenio: \$4,40/t caña de azúcar
- Porcentaje de la mano de obra en los costos de operación: 30%
- Factor de conversión del etanol: 0,08 m<sup>3</sup> etanol/t caña de azúcar
- Costos de la caña de azúcar
- Costo de transporte: \$3,06/t caña de azúcar (FIRA 2007)
- Costos de campo: \$30/t caña de azúcar (FIRA 2007)
- Porcentaje de la mano de obra en los costos de campo: 40%

### Producción de energía

- Generación de electricidad: 0,08 MWh/t caña de azúcar
- Consumo de electricidad: 0,03 MWh/t caña de azúcar
- Factor de pérdidas de distribución: Voltaje de subtransmisión

### Supuestos de la plantación

- Rendimiento: 61 t/año/ha

**Cuadro C.15** Costos de la línea base y labranza cero

Concepto	Sin proyecto	Con proyecto	
		Primer año	Años posteriores
Uso de tractor (horas/año/ha)	17	12,25	8
Mano de obra (días/año/ha)	14,5	10,6	8,25
Semillas (\$/ha/año)	111	111	111
Productos agroquímicos (herbicidas) (\$/ha/año)	106	106	160
Fertilizante (\$/ha/año)	324	324	389
Productividad (t/ha)	3,20	3,20	En gradual aumento
Aumento anual de productividad (t/ha/año)	n.a.	n.a.	0,1
Disponibilidad de rastrojo para la venta (%)	70	0	0

Fuente: FIRA, 2006a y 2006b; y Etchevers, Tinoco y Riegelhaupt, 2008.  
n.a. No aplica.

### Etanol de sorgo

- Definición del programa: Desarrollar 3 millones de hectáreas para la producción de etanol de sorgo grano

### Supuestos del proyecto

- Capacidad de una planta típica de etanol a base de grano de sorgo: 165.000 m<sup>3</sup> etanol/año; 0,5 millones de litros por día
- Vida útil: 25 años
- Costo unitario de inversión, incluyendo planificación: \$557/m<sup>3</sup> etanol/año
- Perfil de inversión: Año -5: 9,1%; Año -4: 22,7%; Año -3: 27,3%; Año -2: 18,2%; Año -1: 22,7%
- Operación y mantenimiento: \$11,42/t sorgo
- Participación de la mano de obra en los costos de operación y mantenimiento: 12%
- Factor de conversión del etanol: 0,36 m<sup>3</sup> etanol/t sorgo
- Costo de transporte, promedio 100km: \$8,49/t sorgo
- Costos de campo: \$135/t sorgo
- Participación de la mano de obra en los costos de campo: 18%
- Venta de subproductos: pasta de destilería (o pasta de DDG, *dried distiler's grains*): 0,333 t DDG/t sorgo, a \$140/t DDG
- Consumo de electricidad: 0,0756 MWh/t sorgo
- Factor de pérdidas de distribución: Bajo voltaje primario
- Consumo de gas natural: 0,00835 GJ/t sorgo
- Rendimiento alto del sorgo: 3,5 t/año/ha
- Rendimiento medio del sorgo: 2 t/año/ha
- Las superficies de rendimiento alto y medio crecen hasta un total de 3 millones de hectáreas

### Biodiesel de palma

- Definición del programa: Desarrollar la producción de biodiesel de aceite de palma en México para alcanzar una superficie de 215.000 hectáreas en el 2030

### Supuestos del proyecto

- Inversión en planta, incluyendo la etapa de planificación: \$12.482.800 /planta
- Capacidad de la planta: 37.854 m<sup>3</sup>/año
- Vida útil: 23 años
- Perfil de inversión: Año -2: 9%; Año -1: 91%
- Costos fijos de operación y mantenimiento: \$377.900/año/planta
- Participación de la mano de obra en los costos de operación y mantenimiento: 47%
- Costo de los racimos con fruta fresca: \$111/t
- Participación de la mano de obra en los costos de los racimos de fruta fresca: 45%
- Rendimiento del aceite proveniente de los racimos de fruta fresca: 20,40% ([www.fede-palma.org](http://www.fede-palma.org))
- Uso de otras materias primas: Ver cuadro C.16
- Materiales varios: \$153.000/año/planta
- Las emisiones de GEI provenientes del uso de estos materiales se calculan a partir de los factores de emisión del PICC
- Consumo de electricidad: 1.008MWh/año/planta
- Factor de pérdidas de distribución: Bajo voltaje primario
- Consumo de diesel (para transporte): 10.000 GJ/año/planta

**Cuadro C.16** *Uso de materias primas en la producción de biodiesel*

<i>Materia prima</i>	<i>Necesidades (t/año/planta)</i>	<i>Costo unitario (\$/t)</i>
CH <sub>3</sub> OH	3.921	278,53
NaOCH <sub>3</sub>	329	953,54
HCl	273	128,06
NaOH	167	598,80
Agua	1.124	1,78

*Fuente:* Estimaciones de Oliver Probst, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

**Subproductos**

- Palmiste (nueces de palma): 7.716 t/año/planta, a \$150/t
- Glicerina: 3.429 t/año/planta, sin valor alguno (\$0/t)

**Supuestos de las plantaciones**

- Rendimiento promedio: 16,3 t de racimos de fruta fresca/año/ha (datos del INEGI)
- La curva de producción alcanza el punto máximo de 24 t/ha/año para las áreas de alto rendimiento y luego declina
- Áreas de rendimiento medio: rendimiento igual al 60% del de las áreas de alto rendimiento

## Bibliografía

- Antonius, A., S. Awerburch, M. Berger, D. Hertzmark, J. M. Huacuz-V., y G. Merino. 2006. *Mexico: Technical Assistance for Long-term Program of Renewable Energy Development*. ESMAP, Documento Técnico 093, Banco Mundial, Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energía (ESMAP), Washington, DC. [tinyurl.com/2jxcuj](http://tinyurl.com/2jxcuj).
- ARB (Air Resources Board). 2009. *Documents from the Air Resources Board of the California Environmental Protection Agency*. [tinyurl.com/ARBggemv](http://tinyurl.com/ARBggemv).
- Armendáriz, C., R. D. Edwards, M. Johnson, M. Zuk, L. Rojas, R. D. Jiménez, H. Riojas-Rodríguez, y O. R. Masera. 2008. "Reduction in Personal Exposures to Particulate Matter and Carbon Monoxide as a Result of the Installation of a Patsari Improved Cook Stove in Michoacan Mexico". *Indoor Air* 18 (2): 93105.
- Bacon, R., J. Halpern, y R. Boyd. 2004. *Energy Policies and the Mexican Economy*. Banco Mundial, Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de Energía (ESMAP), Washington, DC. [tinyurl.com/2ohouh](http://tinyurl.com/2ohouh).
- Banco Mundial. 2006a. *Project Appraisal Document of the Large-Scale Renewable Energy Development Project*. Washington, DC. [tinyurl.com/2zzzoum](http://tinyurl.com/2zzzoum).
- . 2006b. *Technical and Economic Assessment of Off Grid, Mini-Grid and Grid Electrification Technologies. Annexes*. Unidad de Energía, Departamento de Energía y Agua, Washington, DC. [tinyurl.com/wb2006](http://tinyurl.com/wb2006).
- . 2008. *Study of Equipment Prices in the Power Sector*. Borrador. Washington, DC. [tyurl.com/draftdocl](http://tyurl.com/draftdocl).
- Boyd, R., y M. E. Ibararán. 2008. "Extreme Climate Events and Adaptation: An Exploratory Analysis of Drought in Mexico". *Environmental and Development Economics*. Cambridge Univeristy Press, Cambridge. [tinyurl.com/doi4956](http://tinyurl.com/doi4956).
- California Biomass Collaborative. 2008. *Cost of Energy Calculator*. [tinyurl.com/UCDcec](http://tinyurl.com/UCDcec).
- Center for Clean Air Policy-Europe; The Centre for European Policy Studies; Climate Change Capital; The Centre for European Economic Research, y The Institute for Sustainable Development and International Relations. 2008. *Sectoral Approaches: A Pathway to Nationally Appropriate Mitigation Actions*. Informe provisional. [tinyurl.com/SectApp](http://tinyurl.com/SectApp).

- CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2008a. *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico: Generación*. Ciudad de México.
- . 2008b. *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2008-2017*. Ciudad de México. [tinyurl.com/poise2017](http://tinyurl.com/poise2017).
- Christensen, J. H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W. T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña-Rueda, L. Mearns, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, y P. Whetton. 2007. “Regional Climate Projections in Climate Change 2007: The Physical Science Basis.” Contribution of Working Group I to the *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 847–94. Cambridge: Cambridge University Press. [tinyurl.com/ar4wg1ch1l](http://tinyurl.com/ar4wg1ch1l).
- CIEco (Centro de Investigaciones en Ecosistemas). 2008. *Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México. Reporte final*. [tinyurl.com/lcabmex](http://tinyurl.com/lcabmex).
- CMR (Comisión Mundial de Represas). 2000. *Represas y Desarrollo. Un nuevo marco para la toma de decisiones. El reporte final de la Comisión Mundial de Represas*. [tinyurl.com/wcdesp](http://tinyurl.com/wcdesp).
- CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía). 2002. *Programas estatales de minihidráulica*. [tinyurl.com/prminih](http://tinyurl.com/prminih).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2001. *Programa estratégico forestal para México 2025*. [tinyurl.com/PEF2025](http://tinyurl.com/PEF2025).
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2006. *Proyecciones de la población de México 2005-2050*. [tinyurl.com/PobMex50](http://tinyurl.com/PobMex50).
- CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía). 2009. *Estrategia integral para el fomento de la cogeneración en México*. Borrador.
- CTS (Centro de Transporte Sostenible de México). 2009. *México, Estudio para la Disminución de Emisiones de Carbono (MEDEC) en el Sector Transporte*. Ciudad de México.
- Dargay, J., D. Gately, y M. Sommer. 2007. *Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960–2030*. [tinyurl.com/voigww](http://tinyurl.com/voigww).
- de Dinechin, F., y G. Larson. 2007. “Returning Young Mexican Farmers to the Land. *Agricultural and Rural Development Notes 23* (Junio). Banco Mundial, Washington, DC. [tinyurl.com/ARD2307](http://tinyurl.com/ARD2307).
- Delphi Group, e IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas). 2006. *Reviewing Gaps in Resource Mapping for Renewable Energy in North America*. Comisión para la Cooperación Ambiental. [tinyurl.com/367s42](http://tinyurl.com/367s42).
- de Jong, B. H. J., y M. Olguín-Alvarez. 2008. *Mitigation Potential in the Forestry Sector*. Banco Mundial, Washington, DC.
- De la Torre, A., P. Fajnzylber, y J. Nash. 2009. *Low Carbon, High Growth: Latin American Responses to Climate Change*. Banco Mundial, Washington, DC. [tinyurl.com/WB47604](http://tinyurl.com/WB47604).

- Etchevers, J., J. A. Tinoco, y E. Riegelhaupt. 2008. *Production of Maize under Conservation Tillage*. Banco Mundial, Washington, DC.
- FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica). 2008. *Resultados*. [tinyurl.com/FideRes](http://tinyurl.com/FideRes).
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 2006a. *Cultivos de maíz y sorgo. Análisis de rentabilidad 2005 y costos de cultivo 2006*. Dirección de Consultoría de Agronegocios, Dirección Regional Occidente, Residencia Estatal Guanajuato, Agosto. [inyurl.com/FIRAgto](http://inyurl.com/FIRAgto).
- . 2006b. *Cultivo de sorgo y maíz amarillo. Análisis de rentabilidad O-I 2005/2006 y Costos de cultivo O-I 2006/2007*. Dirección de Consultoría de Agronegocios, Dirección Regional Norte, Residencia Estatal Tamaulipas, Julio. [tinyurl.com/FIRAtamps](http://tinyurl.com/FIRAtamps).
- . 2007. *Caña de azúcar Ingenio Tres Valles. Análisis de Rentabilidad Zafra 2005-2006 y Proyección de la Rentabilidad Zafra 2007-2008*. Dirección de Consultoría de Agronegocios, Dirección Regional del Sur, Residencia Estatal Veracruz, Enero. [tinyurl.com/FIRAvr](http://tinyurl.com/FIRAvr).
- Galindo, L.M., ed. 2009. *La economía del cambio climático en México. Síntesis*. SEMARNAT y SHCP. [tinyurl.com/eccm2009](http://tinyurl.com/eccm2009).
- García-Frapolli, E., C. Armendáriz, V. M. Berrueta, R. D. Edwards, A. Guevara, H. Riojas-Rodríguez, y O. R. Masera. Próximo a publicarse. *Beyond Fuelwood Savings: Valuing the Economic Benefits of Introducing Improved Biomass Cookstoves in the Purhépecha Region, Mexico*.
- Greenpeace, y EREC (Consejo Europeo para la Energía Renovable). 2008. *Revolución energética: Una perspectiva de energía sostenible para México*. [tinyurl.com/GPrevene](http://tinyurl.com/GPrevene).
- Hondo, H. 2005. "Life Cycle GHG Emission Analysis of Power Generation Systems: Japanese Case". *Energy* 30: 2042–56. [tinyurl.com/LCEjapan](http://tinyurl.com/LCEjapan)
- Houdashelt, M.; N. Helme, y D. Klein. 2009. *Setting Mitigation Goals for Sectoral Programs: A Preliminary Case Study of Mexico's Cement and Oil Refining*. [tinyurl.com/smgfsp](http://tinyurl.com/smgfsp)
- IAEA (Agencia Internacional de Energía Atómica). 2005. *Comparative Assessment of Energy Options and Strategies in Mexico until 2025. Final Report of a Coordinated Research Project 2000–2004*. [tinyurl.com/2jgbr7](http://tinyurl.com/2jgbr7).
- IEA (Agencia Internacional de Energía). 2006. *World Energy Outlook 2006*. [tinyurl.com/weo2006](http://tinyurl.com/weo2006).
- . 2007. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*. [tinyurl.com/tieeco2e](http://tinyurl.com/tieeco2e).
- . 2008a. *Energy Balances of OECD Countries*.
- . 2008b. *Key World Energy Statistics 2008*. [tinyurl.com/kwes08](http://tinyurl.com/kwes08).
- IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas). 2006. *Realización de mediciones de energía eléctrica en viviendas de interés social para el análisis de ahorros energéticos*. [tinyurl.com/rmeevis](http://tinyurl.com/rmeevis).

- IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). 2005. *Escenarios de emisiones y medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en sectores clave (Transporte y Desechos)*. [tinyurl.com/IMPdesech](http://tinyurl.com/IMPdesech) (desechos), [tinyurl.com/IMPtrans](http://tinyurl.com/IMPtrans) (transporte).
- . 2006. *Proyección de emisiones por sector y gas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>) para los años 2008, 2012 y 2030*. [tinyurl.com/F21412](http://tinyurl.com/F21412).
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2006. *Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles, México, D.F.*
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2006. *Obtención de factores de emisión nacionales en el sector agrícola para disminuir incertidumbre en el inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero*. [tinyurl.com/ofensagr](http://tinyurl.com/ofensagr).
- Islas-Samperio, J.M., y E. Gómez-Morales. 2008. *Bancos de información y construcción de indicadores de eficiencia energética en México*. BID, CONAE, IEA, LBNL, BM.
- Johnson, M., R. Edwards, C. Alatorre, y O. Masera. 2008. "In-Field Greenhouse Gas Emissions from Cookstoves in Rural Mexican Households". *Atmospheric Environment* 42 (6): 1206-22. [tinyurl.com/inggefc](http://tinyurl.com/inggefc).
- Johnson, M., R. Edwards, A. Ghilardi, V. Berrueta, D. Gillen, C. Alatorre, y O. Masera. 2009. "Quantification of Carbon Savings from Improved Biomass Cookstove Projects". *Environmental Science & Technology*. 43 (7): 2456-2462. [tinyurl.com/qcsibcp](http://tinyurl.com/qcsibcp).
- Komives, K, T. M. Johnson, J. Halpern, J. L. Aburto, y J. R. Scott. 2009. *Residential Electricity Subsidies in Mexico: Exploring Options for Reform and for Enhancing the Impact on the Poor*. [tinyurl.com/SKU17884](http://tinyurl.com/SKU17884).
- LAERFTE (*Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*). 2008. [tinyurl.com/laerfte](http://tinyurl.com/laerfte).
- LASE (*Ley para el Aprovechamiento Sostenible de la Energía*), 2008. [tinyurl.com/LAPSuEn](http://tinyurl.com/LAPSuEn).
- Martin, J. R. 2008. "Biomass Energy Economics". Trabajo presentado en: Western Forest Economists 43rd Annual Meeting. [tinyurl.com/JRMbee](http://tinyurl.com/JRMbee).
- Masera, O. R., A. D. Cerón, y J. A. Ordóñez. 2001. "Forestry Mitigation Options for Mexico: Finding Synergies between National Sustainable Development Priorities and Global Concerns". *Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change: Special Issue on Land Use Change and Forestry Carbon Mitigation Potential and Cost Effectiveness of Mitigations Options in Developing Countries* 6 (3-4): 291-312. [tinyurl.com/ForMitMex](http://tinyurl.com/ForMitMex).
- Masera, O. et al. 2006. *La bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sostenible*. Red Mexicana de Bioenergía y Comisión Nacional Forestal. [tinyurl.com/biocds](http://tinyurl.com/biocds).
- Masera, O., N. Rodríguez-Martínez, I. Lazcano-Martínez, L. A. Horta-Nogueira, I. C. Macedo, S. C. Trindade, D. Thrän, O. Probst, M. Weber, y F. Müller-Langer. 2006. *Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México*. Secretaría de Energía, Banco Interamericano de Desarrollo y GTZ. [tinyurl.com/pvubbtm](http://tinyurl.com/pvubbtm).

- McKinsey, y CMM (Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente, A.C.). 2009. *Low-Carbon Growth. A Potential Path for Mexico*.
- McNeil, M.A. y V. E. Letschert. 2008. *Future Air Conditioning Energy Consumption in Developing Countries and What Can Be Done about It: The Potential of Efficiency in the Residential Sector*. Documento LBNL-63203, Lawrence Berkeley National Laboratory. [tinyurl.com/LBNL63203](http://tinyurl.com/LBNL63203).
- Mulás, P. et al. 2005. *Prospectiva sobre la utilización de las energías renovables en México. Una visión al año 2030*. Universidad Autónoma Metropolitana. [tinyurl.com/psuerm](http://tinyurl.com/psuerm).
- Navarro, A. 2000. *Manual práctico de labranza de conservación*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, México.
- NRCan (Ministerio de Recursos Naturales de Canadá). 2007. *Commercial and Institutional Consumption of Energy Survey 2005*. [tinyurl.com/cices06](http://tinyurl.com/cices06).
- PECC (Programa Especial de Cambio Climático). 2009. [tinyurl.com/pecc2009](http://tinyurl.com/pecc2009).
- Pemex (Petróleos Mexicanos). 2004. *Cogeneración en Pemex*. Presentación en Power Point, Mayo.
- . 2008. *Reportes de resultados financieros*. Ciudad de México. [tinyurl.com/Pemexres](http://tinyurl.com/Pemexres).
- Pennise, D. M., K. R. Smith, J. P. Kithinji, M. E. Rezende, T. J. Raad, J. Zhang, y C. Fan. 2001. "Emissions of Greenhouse Gases and Other Airborne Pollutants from Charcoal Making in Kenya and Brazil". *Journal of Geophysical Research* 106 (2): 143–44,155. [tinyurl.com/GHGchKB](http://tinyurl.com/GHGchKB).
- PGPB (Pemex Gas y Petroquímica Básica). 2006. *Methane Emissions Reduction from Compressors, Pilot Project*. 13rd Annual Natural Gas Star Implementation Workshop. Houston. [tinyurl.com/mercphp](http://tinyurl.com/mercphp).
- PICC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). 2007. *IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. [tinyurl.com/AR4psb](http://tinyurl.com/AR4psb).
- Pitty, A. 1997. *Introducción a la biología, ecología y manejo de malezas*. Tegucigalpa, Honduras: Zamorano.
- PND (*Plan Nacional de Desarrollo 2007–2012*). 2007. [pnd.presidencia.gob.mx](http://pnd.presidencia.gob.mx).
- PROCALSOL (Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México). 2007. [tinyurl.com/Procalsol](http://tinyurl.com/Procalsol).
- Rojas, L. A., A. Mora, y H. Rodríguez. 2002. "Efecto de la labranza mínima y la convencional en arroz en la región Huetar norte de Costa Rica." *Agronomía Mesoamericana* 13 (2):111-16. [tinyurl.com/Rojas2002](http://tinyurl.com/Rojas2002).
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2007a. *Labranza de conservación*. [tinyurl.com/LabCons](http://tinyurl.com/LabCons).
- . 2007b. *Programa sectorial de desarrollo agropecuario y pesquero 2007–2012*. [tinyurl.com/psdaf12](http://tinyurl.com/psdaf12).

- Sanchez, I.; H. Pulido; M.A. McNeil; I. Turiel, y M. della Cava. 2007. *Assessment of the Impacts of Standards and Labeling Programs in Mexico (four products)*. Documento LBNL-62813, Lawrence Berkeley National Laboratory. [tinyurl.com/LB62813](http://tinyurl.com/LB62813).
- Sci-Tech Encyclopedia. 1997. *Cogeneration* (Cogeneración). McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology. New York: McGraw-Hill. [tinyurl.com/l25b86](http://tinyurl.com/l25b86). Citado en <http://www.answers.com/topic/cogeneration>.
- Schmidt, J.; N. Helme; J. Lee, y M. Houdashelt. 2007. "Sector-based approach to the post-2012 climate change policy architecture". *Climate Policy*, 8 (2008) 494-515. doi:10.3763/cpol.2007.0321. [tinyurl.com/103763](http://tinyurl.com/103763).
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. 2008. *Programa de acción climática de la ciudad de México 2008-2012*. [tinyurl.com/PACCcm](http://tinyurl.com/PACCcm).
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca), e INE (Instituto Nacional de Ecología). 1997. *México primera comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. [tinyurl.com/fncmex](http://tinyurl.com/fncmex).
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2007. *Estrategia nacional de cambio climático*. [tinyurl.com/enacc2007](http://tinyurl.com/enacc2007).
- , e INE (Instituto Nacional de Ecología). 2001. *México segunda comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. [tinyurl.com/sncmex](http://tinyurl.com/sncmex).
- . 2006a. *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002*. [tinyurl.com/INEGEI2002](http://tinyurl.com/INEGEI2002).
- . 2006b. *México tercera comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. [tinyurl.com/tncmex](http://tinyurl.com/tncmex).
- SENER (Secretaría de Energía). 2007. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2007-2016*. [tinyurl.com/PSE2016](http://tinyurl.com/PSE2016).
- . 2008a. Diagnóstico: Situación de Pemex 2008.
- . 2008b. *Prospectiva del mercado de gas natural 2008-2017*. [tinyurl.com/pgn2017](http://tinyurl.com/pgn2017).
- . 2008c. *Prospectiva del sector eléctrico 2008-2017*. [tinyurl.com/PSE2017](http://tinyurl.com/PSE2017).
- . 2008d. *Sistema de Información Energética*, [tinyurl.com/senerSIE](http://tinyurl.com/senerSIE).
- Sheinbaum, C. y O. Masera. 2000. "Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities: The case of Mexico". *Climatic Change* 47: 259-282. [tinyurl.com/mcewandp](http://tinyurl.com/mcewandp).
- SIACON (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta). 2007. [tinyurl.com/SIACON](http://tinyurl.com/SIACON).
- Southern California Edison. 2008. *Distribution Loss Factors, 2008 Averages*. [tinyurl.com/SCEDLF](http://tinyurl.com/SCEDLF).
- Taylor, R. P., C. Govindarajalu, J. Levin, A. S. Meyer, y W. A. Ward. 2008. *Financing Energy Efficiency: Lessons from Brazil, China, India and Beyond*. Banco Mundial, Washington DC. [tinyurl.com/wb42529](http://tinyurl.com/wb42529).

- Transit Cooperative Research Program (TCRP). 1998. *The Costs of Sprawl-Revisited*. Informe TCRP 39, Transportation Research Board, National Research Council. [tinyurl.com/tcrp39](http://tinyurl.com/tcrp39).
- Troncoso, K., A. Castillo, O. Masera, y L. Merino. 2007. "Social Perceptions about a Technological Innovation for Fuelwood Cooking: Case Study in Rural Mexico". *Energy Policy* 35 (5): 2799-2810. [tinyurl.com/spatifc](http://tinyurl.com/spatifc).
- Vergara, W. 2008. "Climate Hotspots: Climate-Induced Ecosystem Damage in Latin America". Documento de Trabajo 32 sobre Desarrollo Sostenible de la LCR. Banco Mundial, Washington, DC. [tinyurl.com/LCRSDW32](http://tinyurl.com/LCRSDW32).
- Wingate, M., J. Hamrin, L. Kvale, y C. Alatorre. 2007. *Fostering Renewable Electricity Markets in North America*. Comisión para la Cooperación Ambiental. [tinyurl.com/2ecyh4](http://tinyurl.com/2ecyh4).
- Xiaoyu, Yan. 2008. *Life Cycle Fossil Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in China's Road Transport Sector*. Queen Mary College, Universidad de Londres. [tinyurl.com/dffwjv](http://tinyurl.com/dffwjv).

